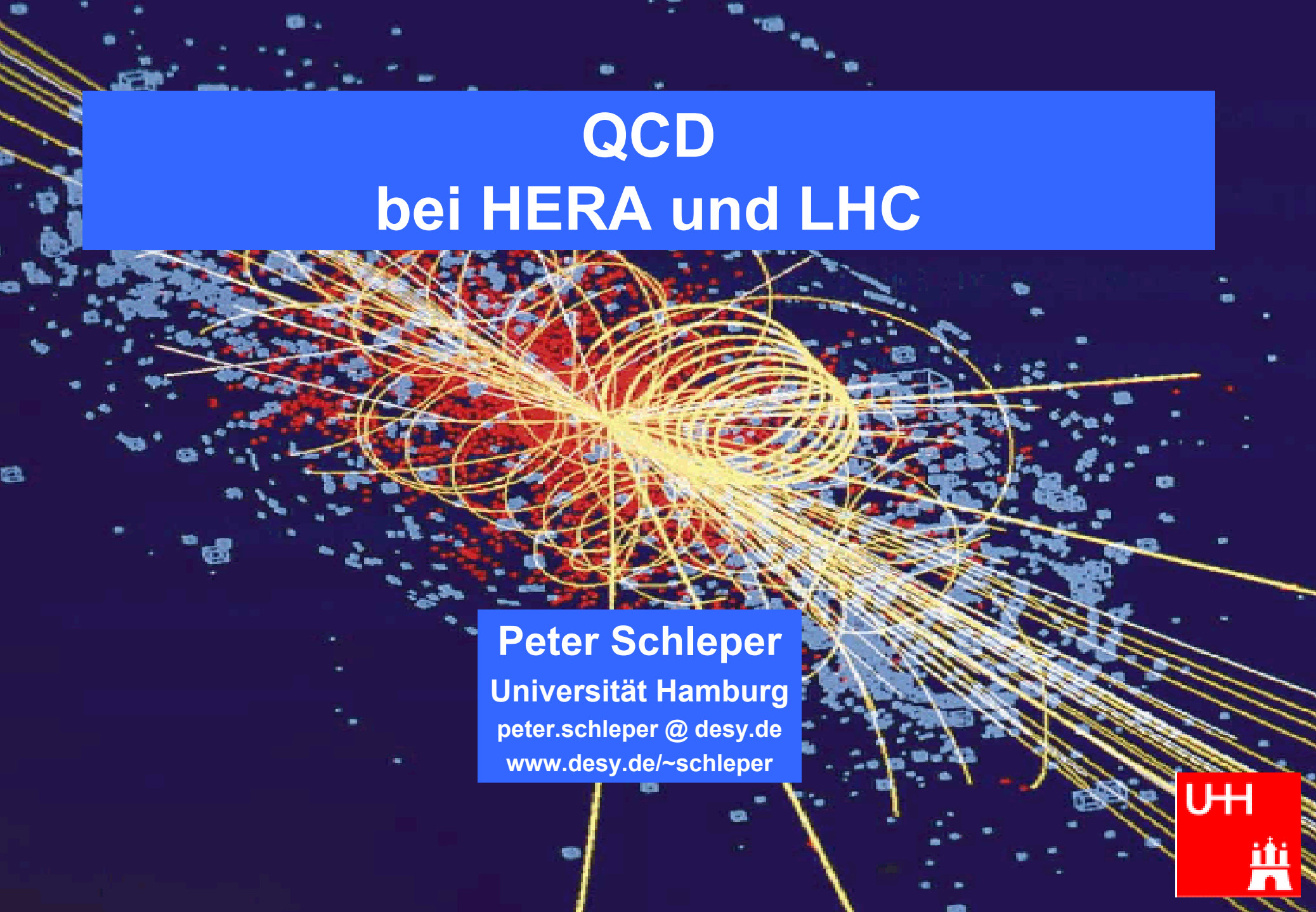


A visualization of a particle collision, likely at a high-energy collider. It features a dense, tangled web of yellow and orange lines radiating from a central point, set against a dark blue background with scattered red and white dots. The lines represent particle tracks or energy flows.

QCD bei HERA und LHC

Peter Schleper
Universität Hamburg
peter.schleper@desy.de
www.desy.de/~schleper



Diese Vorlesung:

www.desy.de/~schleper/lehre/

Frei verfügbar im WEB:

- *Lectures on HERA Physics*, Brian Foster, hep-ex/0206011
- *Hard interactions of quarks and gluons: a primer for LHC physics*
J. M. Campbell, JW. Huston and W. J. Stirling, <http://stacks.iop.org/RoPP/70/89>
- *A QCD primer*, G. Altarelli, CERN School 2001,
<http://preprints.cern.ch/cernrep/2002/2002-002/2002-002.html>
- *Quantum Chromodynamics*
M.H.Seymour, 2004 European School of High-Energy Physics, hep-ph/0505192
- *HERA and the LHC, CERN-DESY Workshop*, <http://www.desy.de/~heralhc/>

Lehrbücher

- *QCD and Collider Physics*, Stirling, Webber, Ellis

1. Einleitung

Zeitalter der Hadron- Collider:

- HERA: Elektron-Proton $E_{\text{CMS}} = 320 \text{ GeV}$ Ende im Juni 2007
- Tevatron: Proton-Antiproton $E_{\text{CMS}} = 2 \text{ TeV}$ Ende ~ Mitte 2009
- LHC: Proton-Proton: $E_{\text{CMS}} = 14 \text{ TeV}$ Begin ~ Juni 2008

Direktester Fortschritt in der Teilchenphysik:

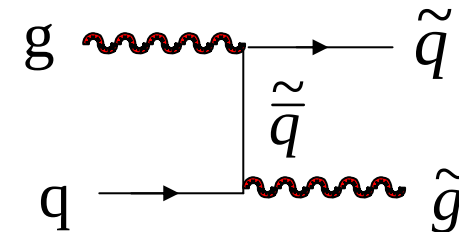
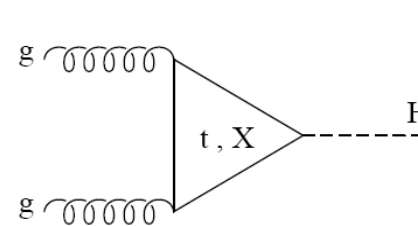
Collider: Nachweis für Higgs, Supersymmetrie, Extra Dimensionen...

abhängig von QCD:

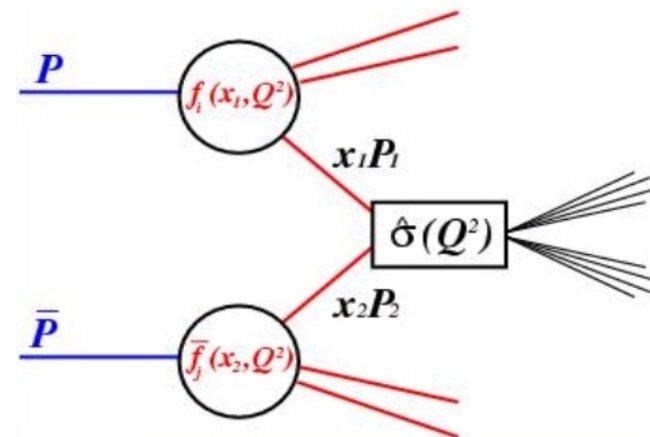
- Produktionsrate neuer Teilchen
- Untergrund durch QCD, bottom, top, W,Z

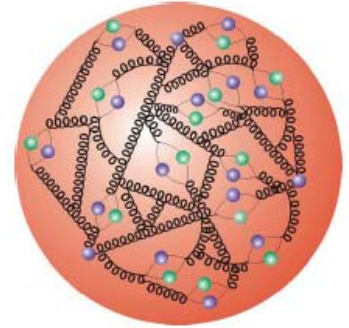
Wie gut verstehen wir:

- QCD Faktorisierung ?
- Parton-Dichten, DGLAP Evolution ?
- QCD Rechnungen in LO, NLO, NNLO, ... ?
- Multi-Parton Endzustände ?
- Jets: Algorithmen, Kalibration ?
- Multi-Parton WW, Diffraktion ?



Factorization





Confinement:

- bei Abständen ≥ 1 fm keine freien Quarks und Gluonen

Asymptotic Freedom

- Bei kleinen Abständen verhalten sich Quarks/Gluonen wie quasifreie Teilchen
- Berechenbar durch Störungsrechnung (pQCD = perturbative QCD)

Infrared Safety

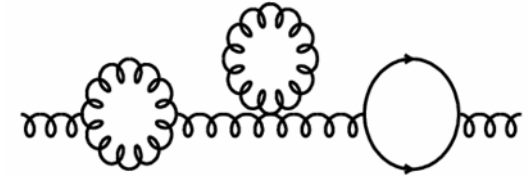
- Einige Observable sind unabhängig von Physik bei großen Abständen
- Berechenbar durch pQCD

Faktorisierung

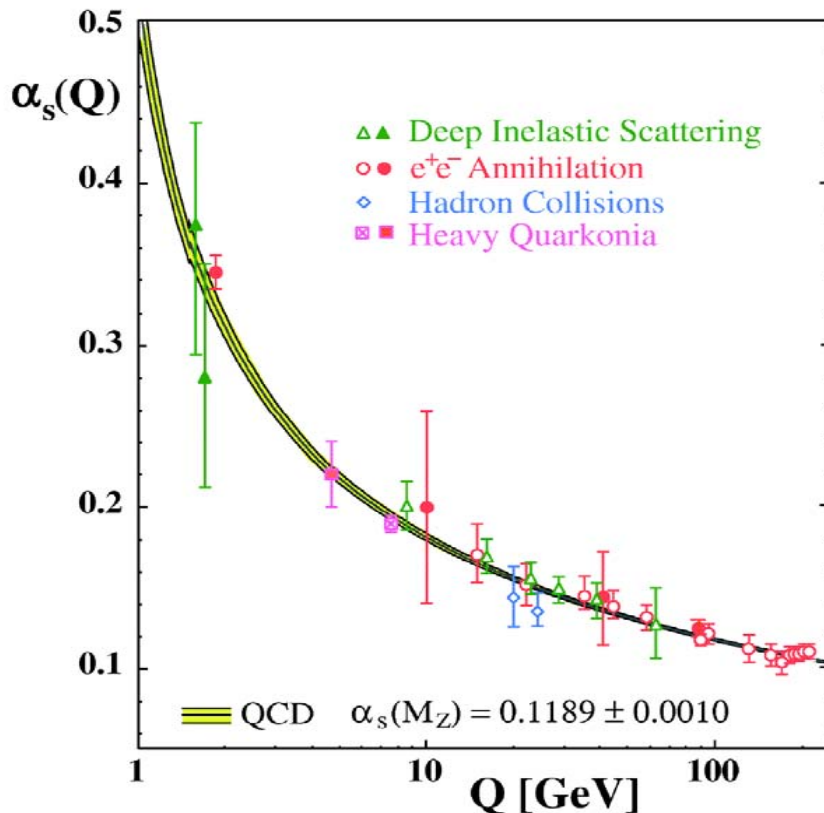
- manche Prozesse lassen sich faktorisieren in universelle Anteile für große Abstände und prozessabhängige Anteile bei kleinen Abständen, die in pQCD berechenbar sind.

QCD: $SU(3)_C$, nicht-abelsche Eichtheorie

- Gluonen tragen Farbe $\leftrightarrow$ Gluon-Selbstwechselwirkung
- Laufende Kopplungskonstante: $\alpha_s(Q^2)$
- Kurze Abstände: $\alpha_s \ll 1 \rightarrow$ Störungsrechnung



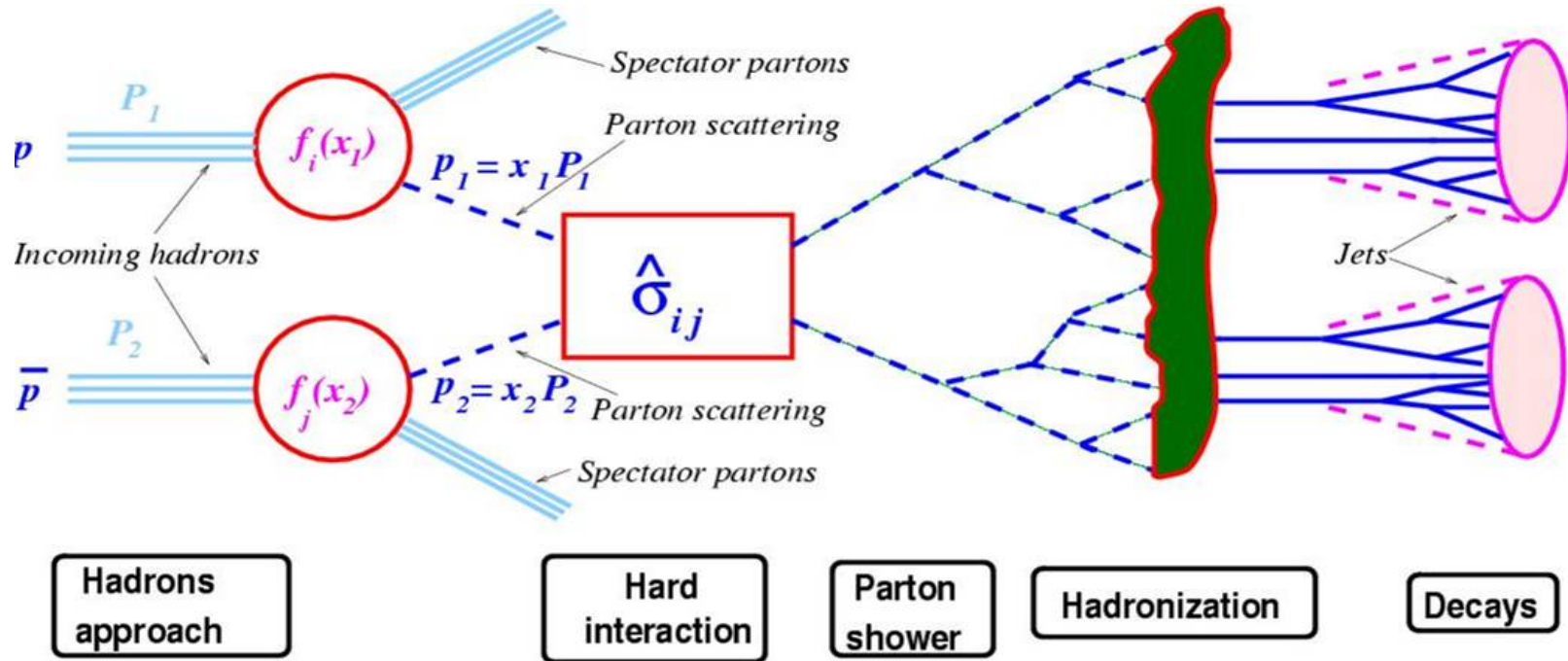
$q \rightarrow q g$ Quark-Gluon Vertex
 $g \rightarrow g g$ 3-Gluon Vertex
 $g \rightarrow g g g$ 4-Gluon Vertex



Vorhersagen der QCD:

- Harte Prozesse: Q^2 groß
Matrix-Elemente für LO, NLO, NNLO
- Skalen-Abhängigkeit von $\alpha_s(Q^2)$
- Skalen-Abhängigkeit der PDFs
Parton-Verteilungen der Hadronen
 $f_{q/p}(x, Q^2)$ Quark-Dichte
 $f_{g/p}(x, Q^2)$ Gluon-Dichte

Theoretische Beschreibung von Hadron-Prozessen

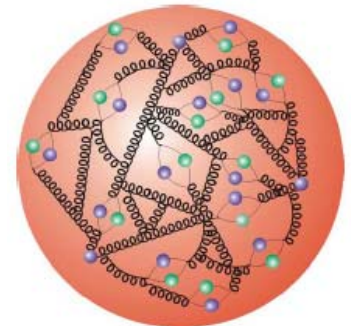


A.Bhatti

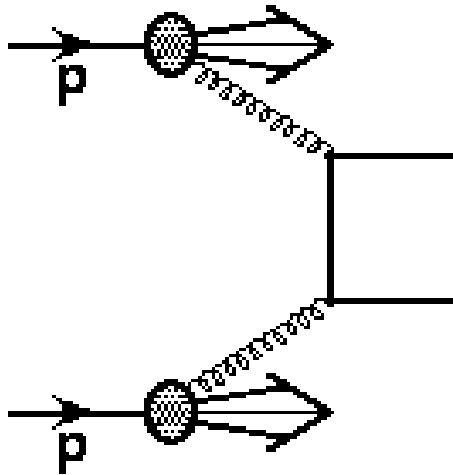
Faktorisierungs- Theorem der QCD: $\sigma = f_{q/p} \cdot f_{q/p} \cdot \hat{\sigma}$

Trennung in Anteile mit kurzer und langer Reichweite

- **Harte WW:** großer Energieübertrag ($\gg 1\text{ GeV}$) $\leftrightarrow$ kurze Reichweite ($\ll 1\text{ fm}$)
Matrix-Elemente: perturbative Rechnung in Ordnungen von $\alpha_s(Q^2)$
 $\hat{\sigma}$ muß für jeden Prozess neu berechnet werden
- **Weiche Anteile:** mit langer Reichweite, nicht perturbativ
Parton- Verteilungen, Parton-Schauer, Hadronisierung
Universell: gleich für alle Prozesse



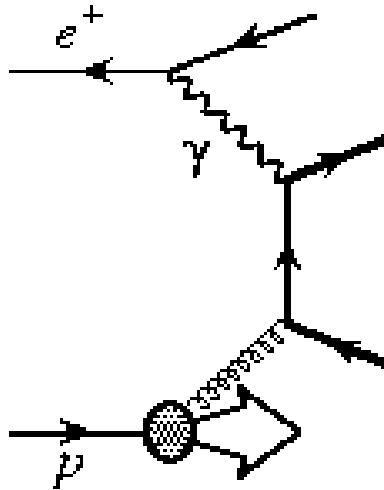
LHC Jet Produktion



$$gg \rightarrow qq$$

$$f_{g/p} \cdot f_{g/p}$$

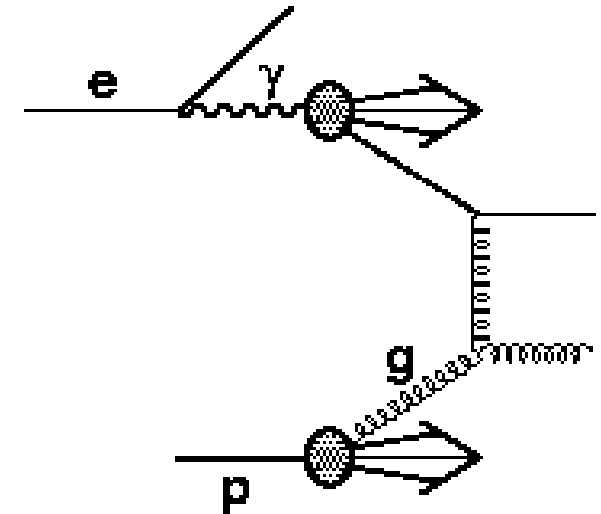
HERA Jet Elektroprod.



$$\gamma g \rightarrow qq$$

$$f_{g/p}$$

HERA Jet Photoprod.



$$qg \rightarrow qq$$

$$f_{\gamma/e} \cdot f_{q/\gamma} \cdot f_{g/p}$$

Elektron-Proton Streuung bei HERA:

- Testlabor für QCD mit Hadronen:
Matrixelemente in NLO, ..., Parton-Verteilungen, Jets,
- Ideale Vorbereitung für Hadron-Hadron Collider wie Tevatron, LHC

DIS bei HERA

Detektor-Akzeptanz → Kin. Bereich

$$10^{-5} < x < 0.6$$

$$1 < Q^2 < 50000 \text{ GeV}^2$$

Verleich zu DIS Fixed Target

- Faktor 500 zu höheren Q^2
- Faktor 500 zu kleineren x

LHC: Erzeugung schwerer Teilchen

Skala: $Q^2 = M_H^2$

- Masse: $M_H^2 = x_1 x_2 s$
- Rapidität: $y_H = \frac{1}{2} \ln(x_1 / x_2)$

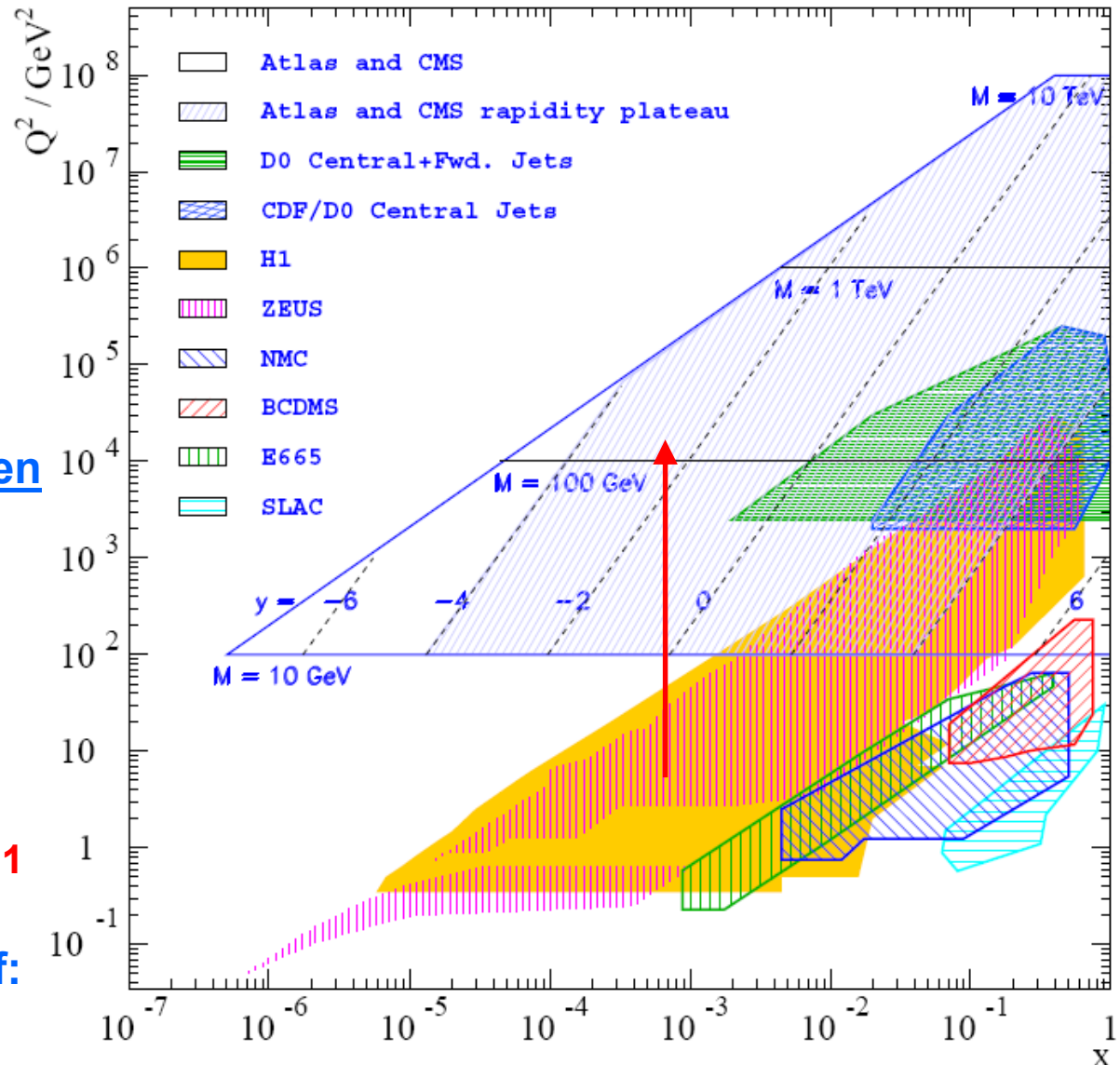
$$\rightarrow x_{1,2} = \frac{M}{\sqrt{s}} e^{\pm y}$$

Für Akzeptanz: $y_H \approx \pm 2.5$

- $M_H \approx 140 \text{ GeV} \rightarrow 10^{-3} < x < 0.1$
- $M_H \approx 1400 \text{ GeV} \rightarrow 10^{-2} < x < 1$

Vorhersagen für LHC beruhen auf:

- PDF bei kleinen Q^2
- QCD Evolution zu hohen Q^2



Tief-inelastische Streuung (DIS): $e + p \rightarrow e + X$

Inelastisch: $M_X \gg M_p$

QED Matrix-Element in LO: eq Streuung

Hier nur Photon Austausch

$$\mathcal{M} = -e^2 \bar{u}(k') \gamma^\nu u(k) \frac{1}{q^2} \bar{u}(p') \gamma_\nu u(p) e_q^2$$

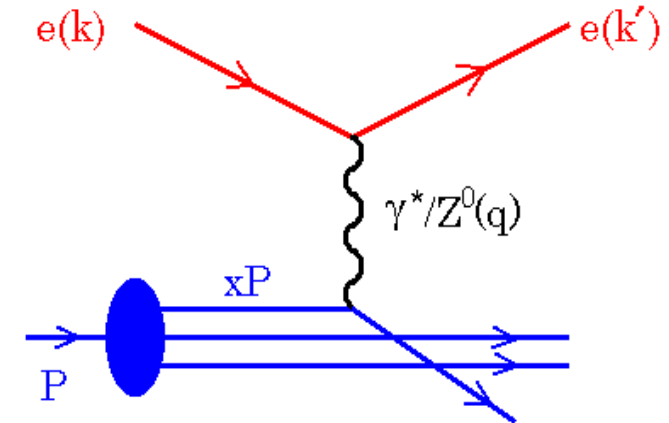
$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{8e^4 e_q^2}{(k - k')^4} [(k' \cdot p')(k \cdot p) + [(k' \cdot p)(k \cdot p')]]$$

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{2ee_q}{\hat{t}^2} (\hat{s}^2 + \hat{u}^2)$$

e-q Wirkungsquerschnitt:

$$\frac{d\sigma}{d\hat{t}} = \frac{1}{16\pi\hat{s}^2} |\mathcal{M}|^2$$

$$\frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}} (eq \rightarrow eq) = e_q^2 \frac{\hat{s}^2 + \hat{u}^2}{8\pi\hat{s}^2} \left(\frac{e^2}{\hat{t}} \right)^2$$



Mandelstamm Variablen:

Masseelos:

$$s \equiv (k + p)^2 \simeq 2k \cdot p \simeq 2k' \cdot p',$$

$$t \equiv (k - k')^2 \simeq -2k \cdot k' \simeq -2p \cdot p',$$

$$u \equiv (k - p')^2 \simeq -2k \cdot p' \simeq -2k' \cdot p,$$

$$\hat{s} + \hat{t} + \hat{u} = 0$$

$$x(s + u) + t = 0.$$

DIS Wirkungsquerschnitt

Impulsübertrag:

$$Q^2 = -t$$

Bjorken Scaling Variablen:

- Streuwinkel im eq-System

$$y = -\hat{t}/\hat{s} \quad y = \sin^2(\frac{1}{2}\hat{\theta})$$

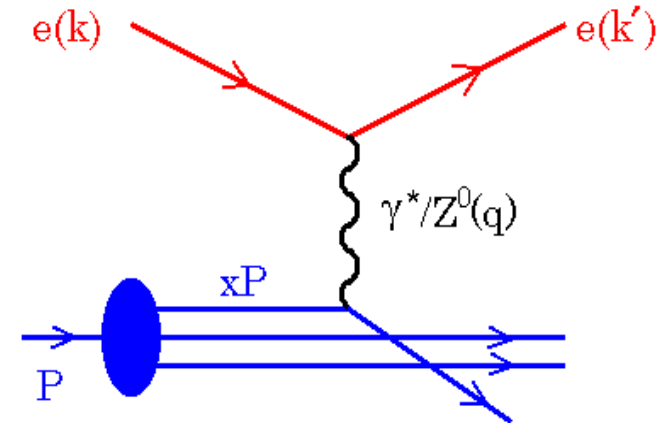
$$1 - y = -\hat{u}/\hat{s}$$

- Impulsbruchteil des Partons im Proton

$$x = \frac{P_{quark}}{P_{Proton}} = \frac{\hat{s}}{s}$$

Im Laborsystem:

$$Q^2 = 4E_e E'_e \sin^2 \frac{\theta}{2}$$



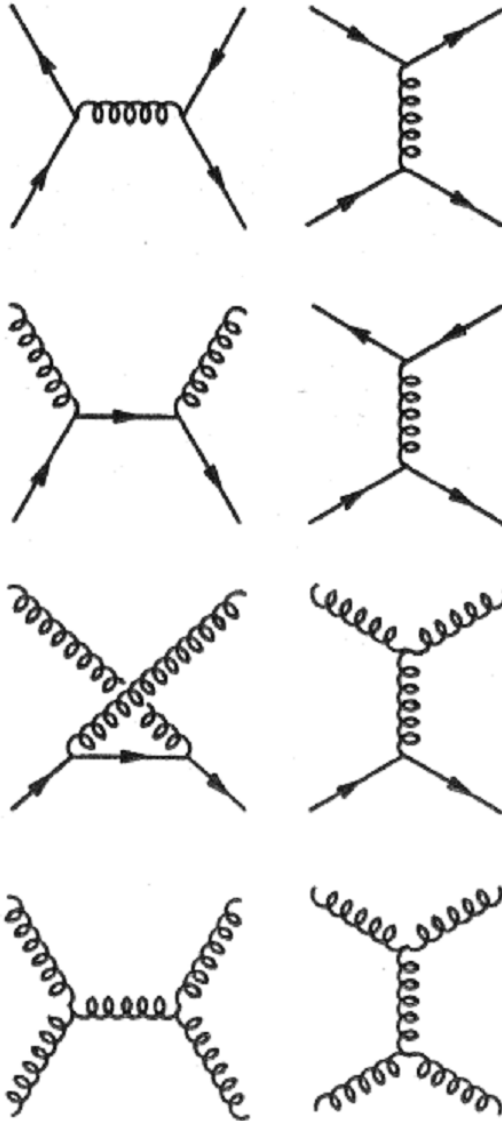
$$\frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}} (eq \rightarrow eq) = e_q^2 \frac{\hat{s}^2 + \hat{u}^2}{8\pi\hat{s}^2} \left(\frac{e^2}{\hat{t}} \right)^2$$

$$\frac{d\hat{\sigma}}{dy} = e_q^2 \frac{2\pi\alpha^2\hat{s}}{Q^4} [1 + (1 - y)^2]$$

$$\frac{d\sigma}{dx dy} = \frac{2\pi\alpha^2 s}{Q^4} [1 + (1 - y)^2] \sum_q e_q^2 x q(x)$$

Strukturfunktion F_2

Matrix-Elemente für $2 \rightarrow 2$ Prozesse der QCD

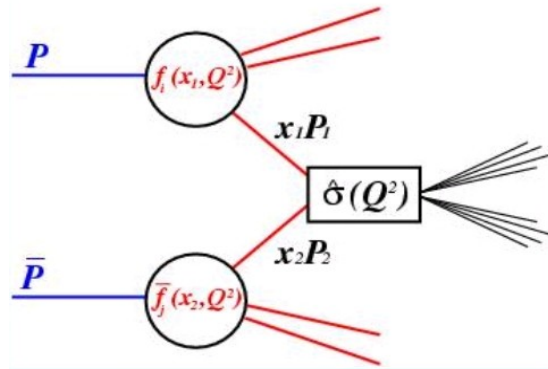


Subprocess	$ \mathcal{M} ^2/g_s^4$	$ \mathcal{M}(90^\circ) ^2/g_s^4$
$qq' \rightarrow qq'$ $q\bar{q}' \rightarrow q\bar{q}'$	$\frac{4}{9} \frac{\hat{s}^2 + \hat{u}^2}{\hat{t}^2}$	2.2
$qq \rightarrow qq$	$\frac{4}{9} \left(\frac{\hat{s}^2 + \hat{u}^2}{\hat{t}^2} + \frac{\hat{s}^2 + \hat{t}^2}{\hat{u}^2} \right) - \frac{8}{27} \frac{\hat{s}^2}{\hat{u}\hat{t}}$	3.3
$q\bar{q} \rightarrow q'\bar{q}'$	$\frac{4}{9} \frac{\hat{t}^2 + \hat{u}^2}{\hat{s}^2}$	0.2
$q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}$	$\frac{4}{9} \left(\frac{\hat{s}^2 + \hat{u}^2}{\hat{t}^2} + \frac{\hat{t}^2 + \hat{u}^2}{\hat{s}^2} \right) - \frac{8}{27} \frac{\hat{u}^2}{\hat{s}\hat{t}}$	2.6
$q\bar{q} \rightarrow gg$	$\frac{32}{27} \frac{\hat{u}^2 + \hat{t}^2}{\hat{u}\hat{t}} - \frac{8}{3} \frac{\hat{u}^2 + \hat{t}^2}{\hat{s}^2}$	1.0
$gg \rightarrow q\bar{q}$	$\frac{1}{6} \frac{\hat{u}^2 + \hat{t}^2}{\hat{u}\hat{t}} - \frac{3}{8} \frac{\hat{u}^2 + \hat{t}^2}{\hat{s}^2}$	0.1
$qg \rightarrow qg$	$\frac{\hat{s}^2 + \hat{u}^2}{\hat{t}^2} - \frac{4}{9} \frac{\hat{s}^2 + \hat{u}^2}{\hat{u}\hat{s}}$	6.1
$gg \rightarrow gg$	$\frac{9}{4} \left(\frac{\hat{s}^2 + \hat{u}^2}{\hat{t}^2} + \frac{\hat{s}^2 + \hat{t}^2}{\hat{u}^2} + \frac{\hat{u}^2 + \hat{t}^2}{\hat{s}^2} + 3 \right)$	30.4

Dominant: $gg \rightarrow gg$, $qg \rightarrow qg$, $q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}$

LHC Partonen & Luminosität

Factorization

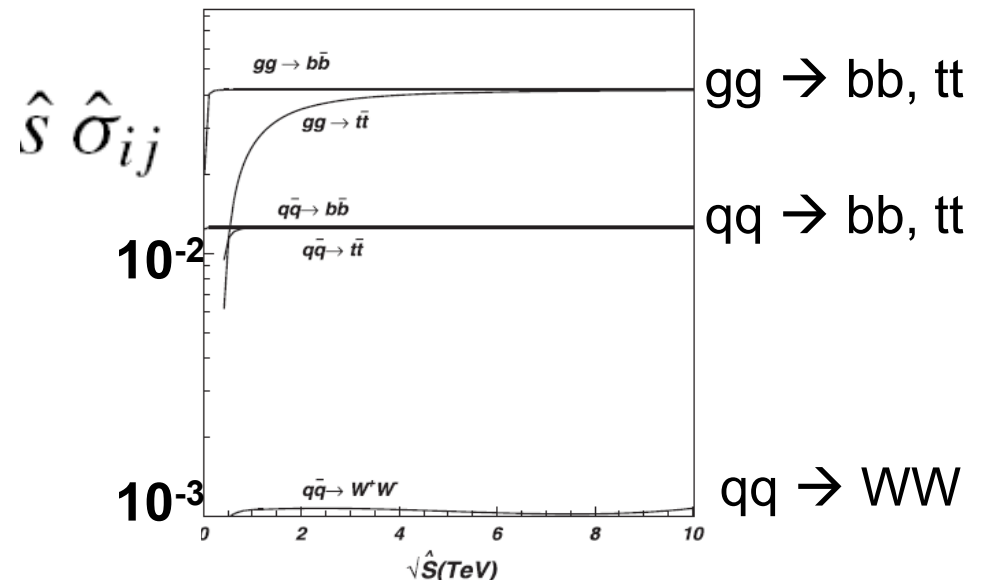
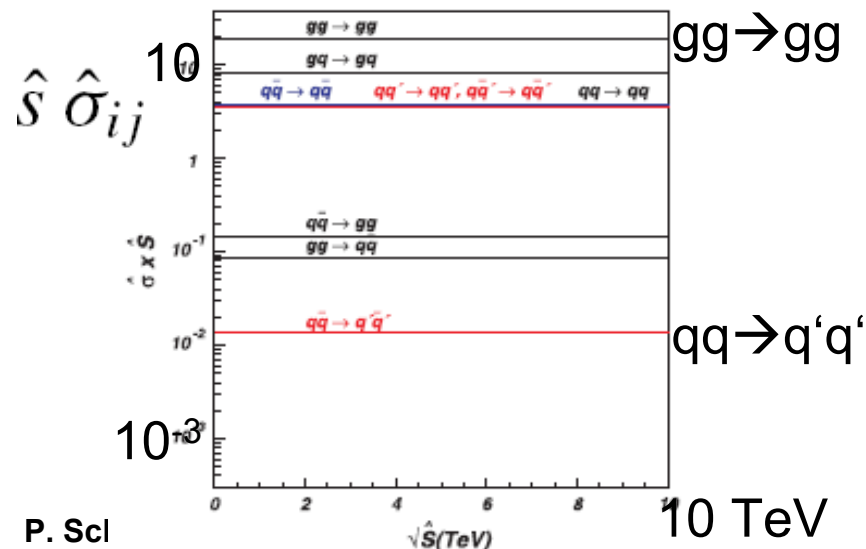


$$\sigma = \sum_{i,j} \int_0^1 dx_1 dx_2 f_i(x_1, \mu) f_j(x_2, \mu) \hat{\sigma}_{ij}$$

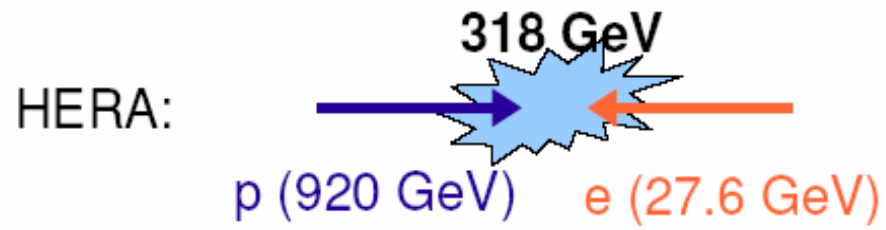
$$\sigma = \sum_{i,j} \int \left(\frac{d\hat{s}}{\hat{s}} dy \right) \left(\frac{dL_{ij}}{d\hat{s} dy} \right) (\hat{s} \hat{\sigma}_{ij})$$

Parton- Luminosität: $\frac{dL_{ij}}{d\hat{s} dy} = \frac{1}{s} \frac{1}{1 + \delta_{ij}} [f_i(x_1, \mu) f_j(x_2, \mu) + (1 \leftrightarrow 2)].$

Parton- Wirkungsquerschnitt: $\hat{s} \hat{\sigma}_{ij} = 10^{-3} \dots 20$



2. HERA



HERA Beschleuniger

HERA– I : 1992 - 2000

- $\sim 120 \text{ pb}^{-1}$ je Experiment, fast nur e^+p

HERA– II: 2003 - 2007

Upgrade: Luminosität & Polarisation: e_L^- , e_R^- , e_L^+ , e_R^+

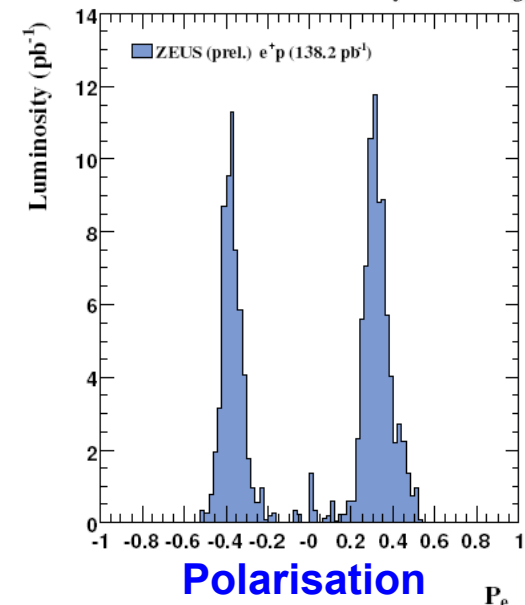
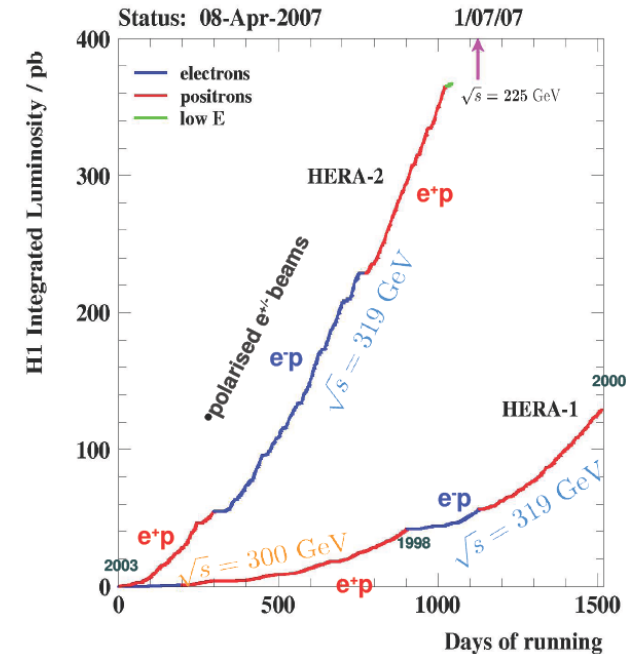
Zuletzt: Gute Strahlbedingungen

→ Niedriger Untergrund, stabile Strahlen

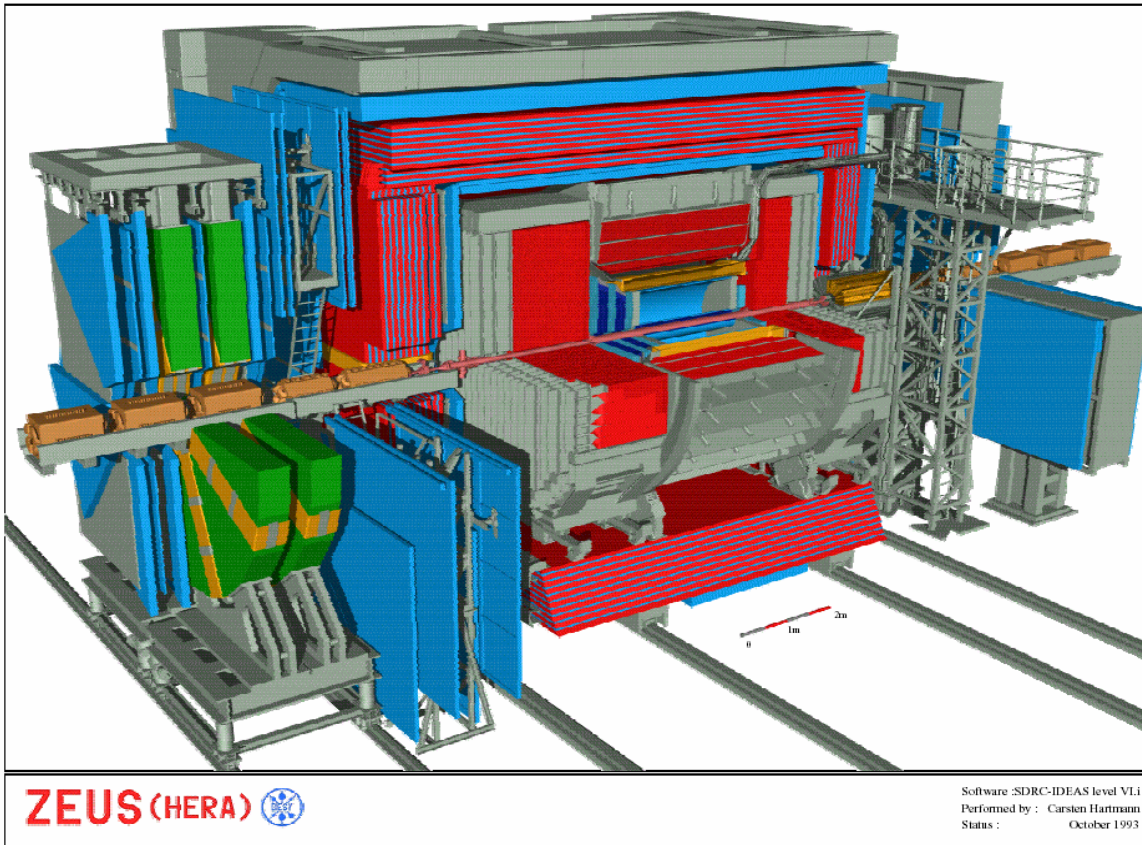
→ Hohe Effizienz der Experiment, niedrige Schwellen

→ Keine größeren Defekte der Detektoren

- **Polarisation**
 - Mittelwert $\sim 40\%$
- **Electron & Positron Strahlen**
 - $\sim 184 \text{ pb}^{-1} e^-p$
 - $\sim 294 \text{ pb}^{-1} e^+p$
- **Luminosität HERA I & II**
 - $\sim 478 \text{ pb}^{-1}$ je Experiment, $\sim 90\%$ bei 320 GeV
- Ende der HERA Datennahe im Juni 2007 → Analyse



HERA Experiments: H1 & ZEUS

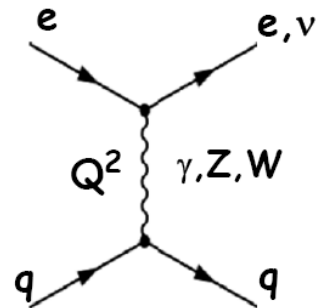


H1 & ZEUS:

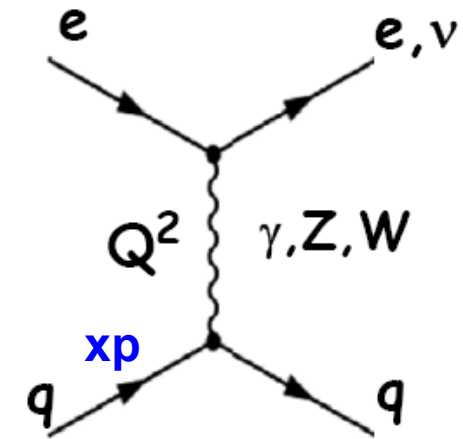
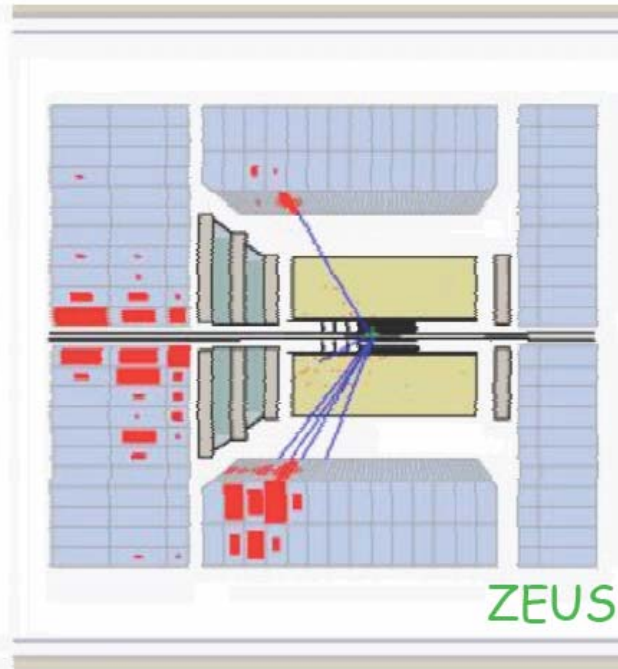
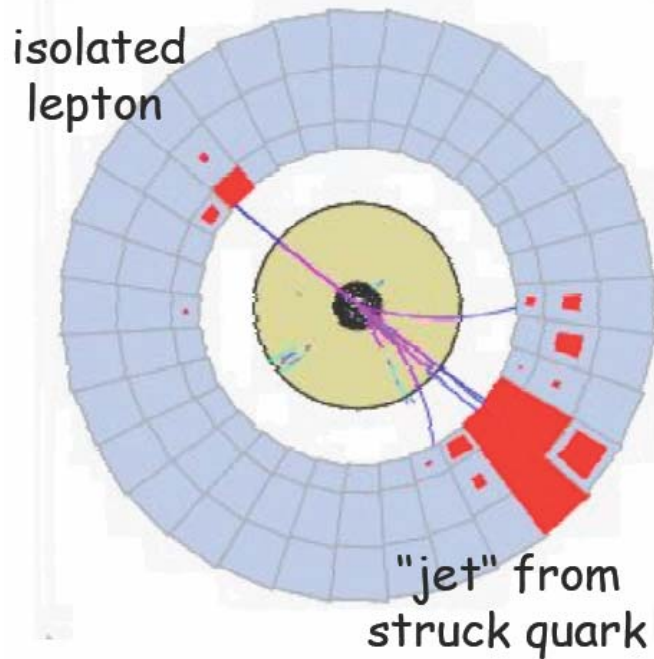
- **Vielzweck- Detektoren**
- **Spurdetektoren** (B-Feld: 1.15 ... 1.5 Tesla)
 - 2-3 Lagen Silizium-Detektoren
 - Zentral: Drift Kammer (~60 hits)
 - Vorwärts: straw tubes/Drift
- **Kalorimeter: hermetisch**
ZEUS: Uran-Szint.
Elektronen: 18%/sqrt(E)
Hadronen: 35%/sqrt(E)
H1: Liquid Argon
Elektronen: 11%/sqrt(E)
Hadronen: 50%/sqrt(E)
- **HERA-II: fokussierende Magnete in den Experimenten**
- **100 Hz Datenrate**

~ 10^8 ep Kollisionen getriggert von H1 & ZEUS

- **Schwellen: 5 ... 10 GeV** für Elektronen und Jets
- **Luminosität: ~ 1.6 ... 3.5 % Genauigkeit**
- **Polarisation: ~ 3 ... 5 % Genauigkeit**
- **Kalorimeter E-Skalen: 1 ... 3 %** für e, jets durch kinematische Constraints



Ereignisse mit Neutralem und Geladenem Strom

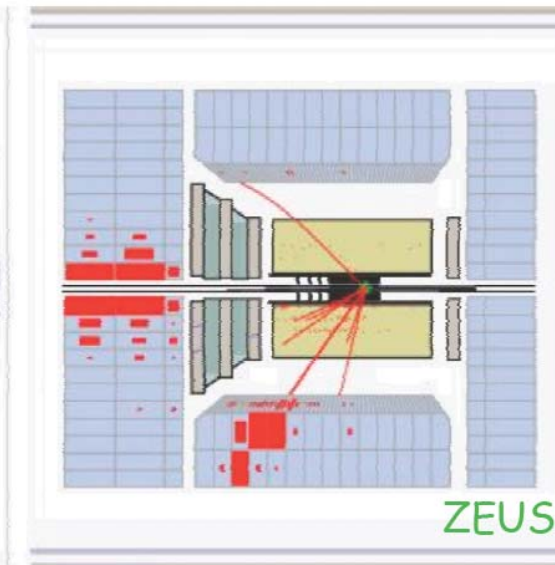
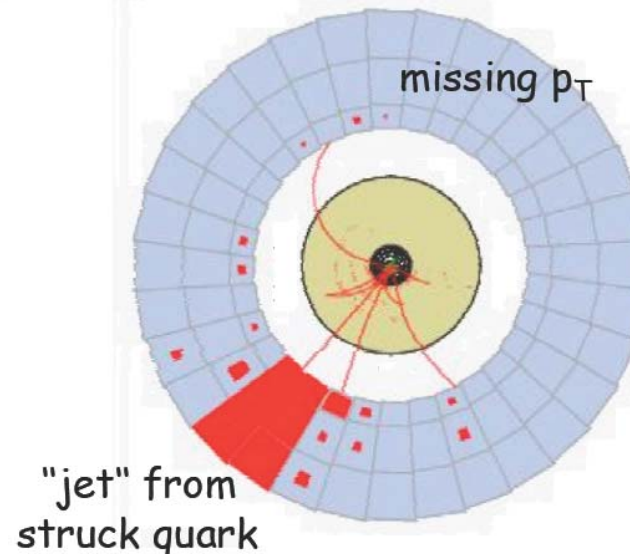


Neutraler Strom: γ, Z
 x, Q^2 Rekonstruktion aus

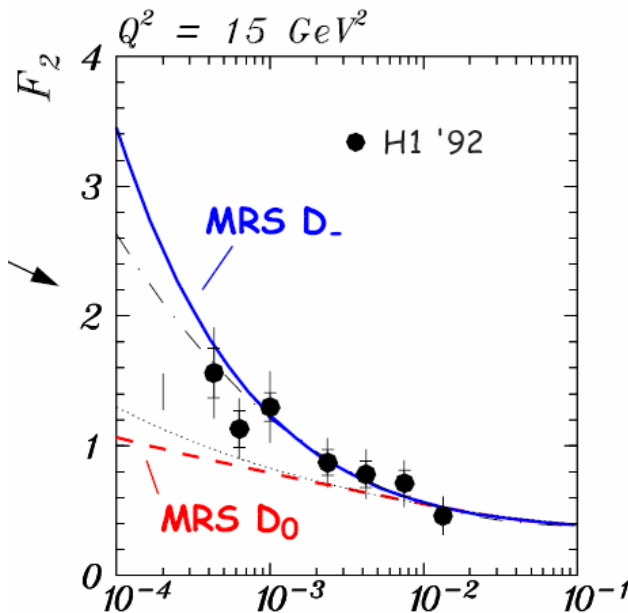
- Elektron E_e, θ_e
- $\sum \text{Hadronen} = xp + q$
- Doppel-Winkel: $\theta_e, \theta_{\text{Hadronen}}$

Kalibration

$$\theta_e, \theta_{\text{Hadronen}} \rightarrow E_e, P_{Te}, P_{T,\text{Hadronen}}$$



Vergleich: Vorhersagen aus Fixed Target Erste HERA Daten (1992)

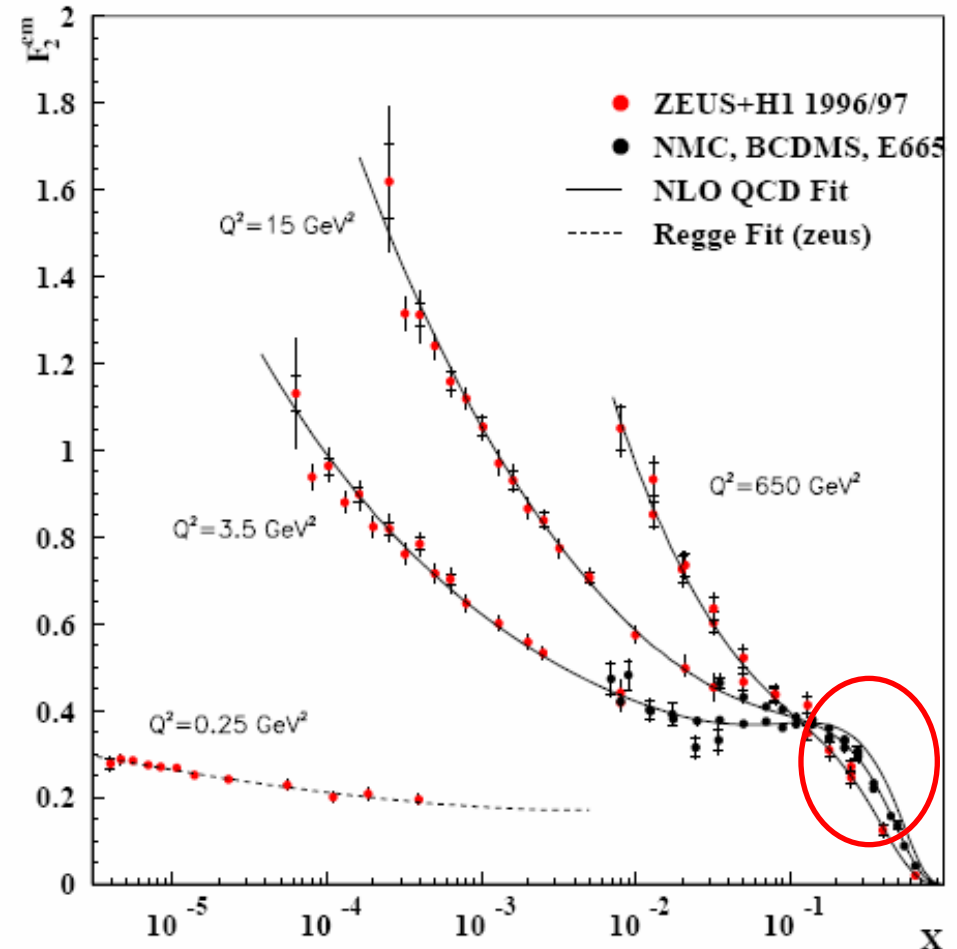


$ep \rightarrow eX$ at small Q^2 :

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} \approx \frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4} F_2$$

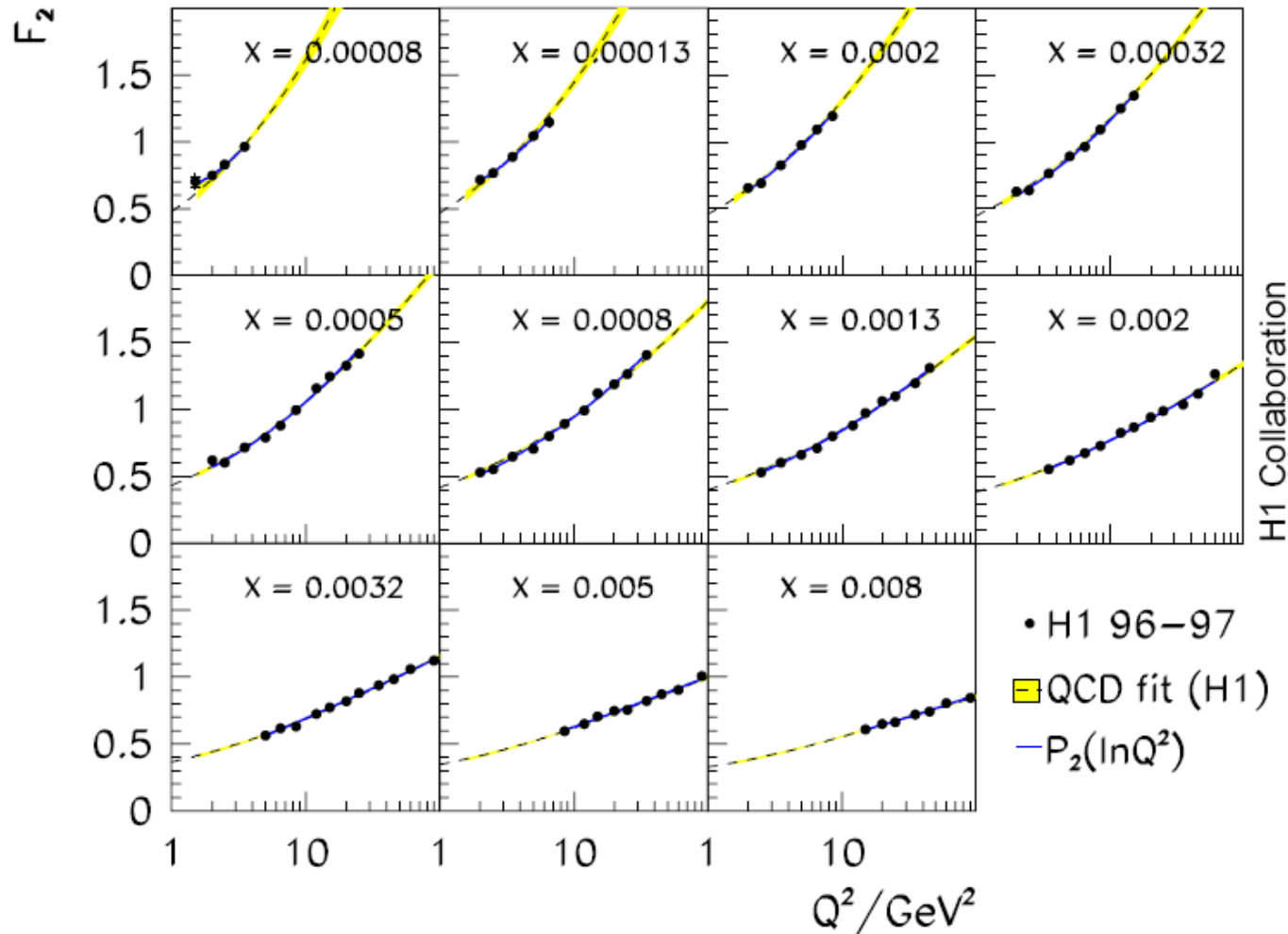
momentum distribution of quarks:

$$F_2(x, Q^2) \approx \sum e_q^2 q(x, Q^2)$$



- Kleine $x \rightarrow$ große Quark Dichte
- Starker Anstieg mit Q^2
 $\rightarrow$ Gluon Dichte und α_s

ep $\rightarrow$ eX bei kleinen Q^2



~ 50 Mill Ereignisse

Kinemat. Bereich:

$$10^{-5} < x < 0.6$$

$$1 < Q^2 < 50000 \text{ GeV}^2$$

(Akzeptanz)

Präzision ~ 2 .. 3 %

systematischer Fehler

Kalibration

Quark-Dichten steigen mit Q^2 , besonders stark bei kleinen x

Scaling (unabh. von Q^2): Streuung an punktförmigen Partonen

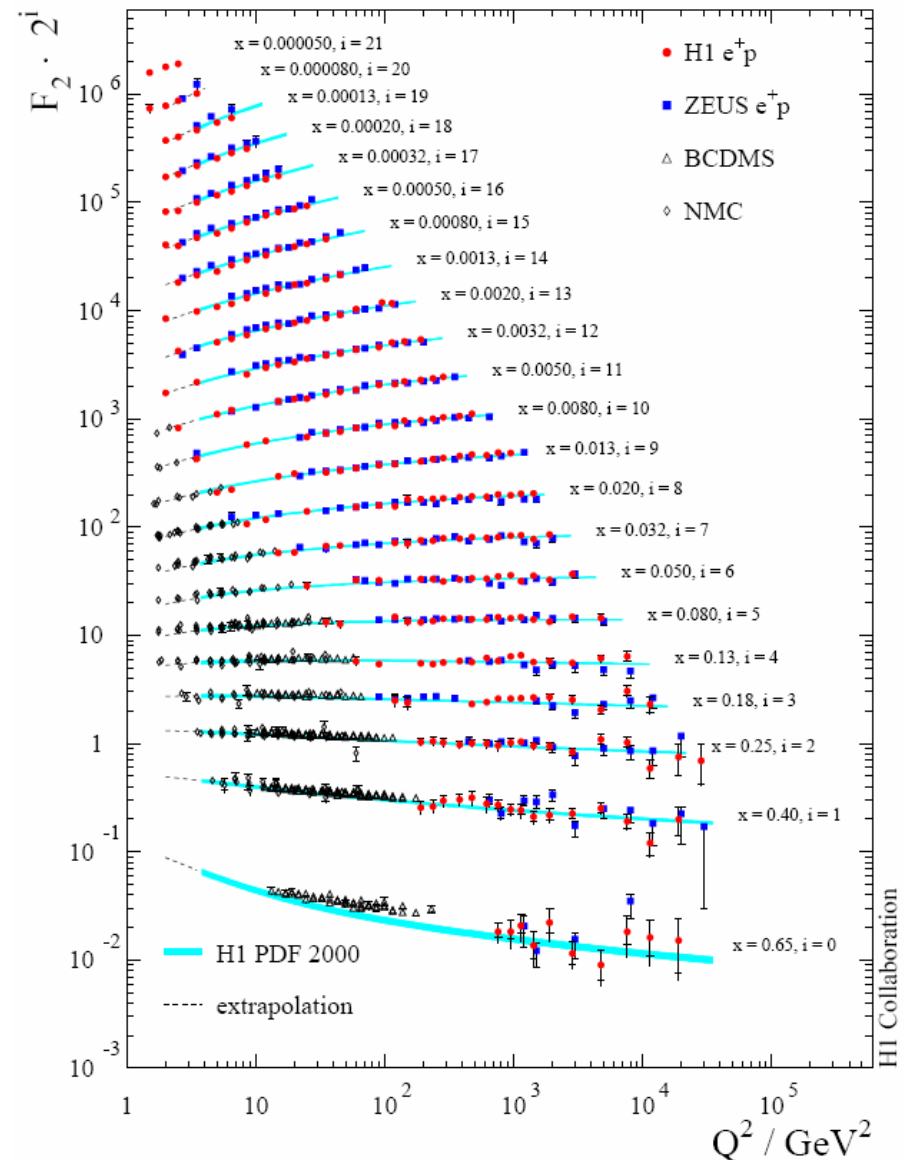
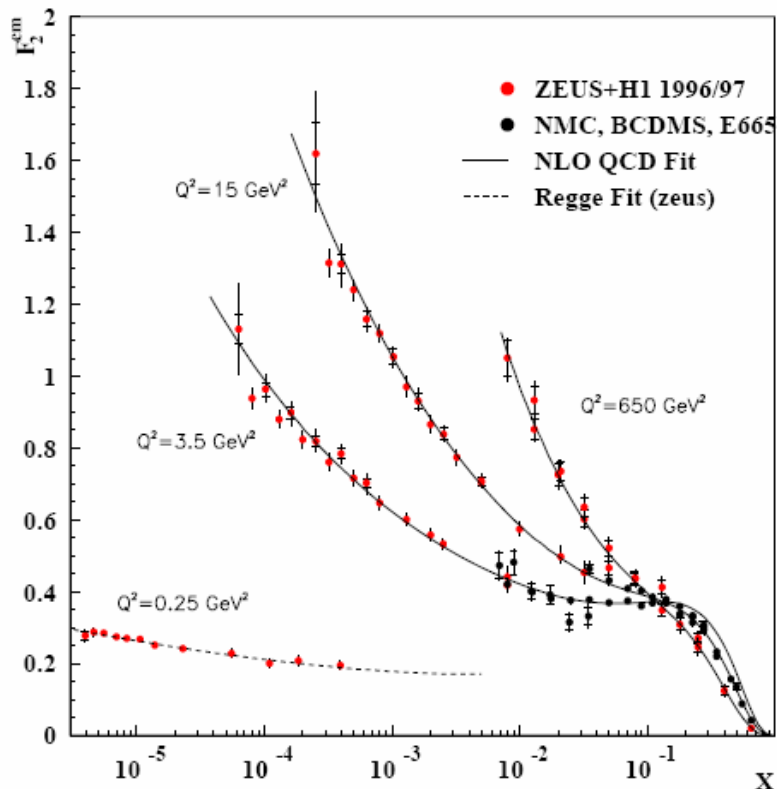
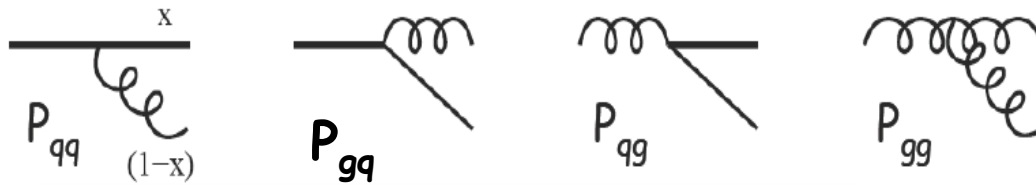
Scaling Violation: Effekt der QCD: Parton Splitting

Q² Abhängigkeit: Gluon density

$q \rightarrow q g$ Quark-Gluon Vertex

$g \rightarrow g g$ 3-Gluon Vertex

$g \rightarrow g g g$ 4-Gluon Vertex

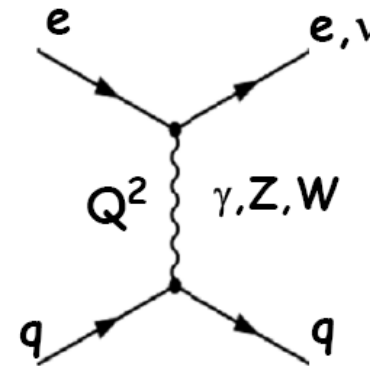


Steigung $\sim a_s g(x, Q^2)$

DIS mit Photon & Z Austausch

Hohe Q^2

- γ/Z Interferenz und W Austausch
- Unterschiede für e^+ und e^-



Neutral Current

$$\frac{d^2\sigma_{NC}^{e\pm p}}{dx dQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4} \left[Y_+ \tilde{F}_2(x, Q^2) \mp Y_- x \tilde{F}_3(x, Q^2) - y^2 \tilde{F}_L(x, Q^2) \right]$$

$$Y_{\pm} \equiv 1 \pm (1-y)^2$$

$$\tilde{F}_2 \equiv F_2 - v_e \frac{\kappa_w Q^2}{(Q^2 + M_Z^2)} F_2^{\gamma Z} + (v_e^2 + a_e^2) \left(\frac{\kappa_w Q^2}{Q^2 + M_Z^2} \right)^2 F_2^Z = x \sum A_i (q_i + \bar{q}_i)$$

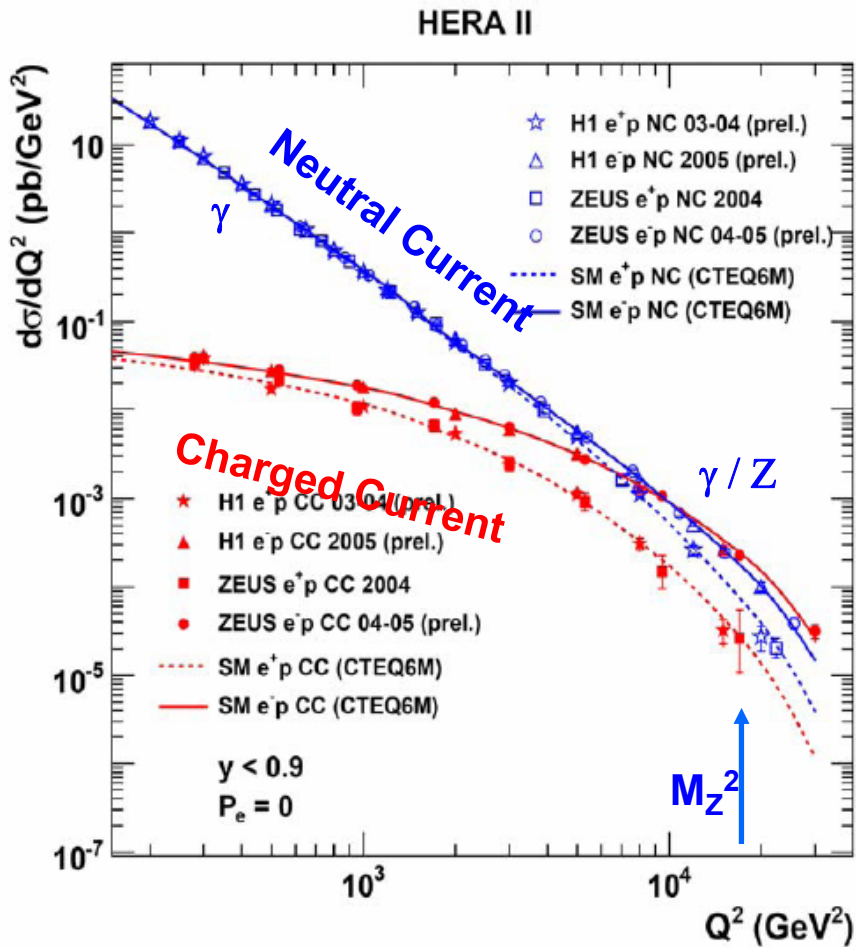
$$x \tilde{F}_3 \equiv -a_e \frac{\kappa_w Q^2}{(Q^2 + M_Z^2)} x F_3^{\gamma Z} + (2v_e a_e) \left(\frac{\kappa_w Q^2}{Q^2 + M_Z^2} \right)^2 x F_3^Z = x \sum B_i (q_i - \bar{q}_i)$$

$$v_e, a_e - \text{vector and axial couplings, } \kappa_w^{-1} = 4 \frac{M_W^2}{s} (1 - \frac{M_W^2}{s})$$

Reduced NC and CC cross sections

$$\tilde{\sigma}_{NC}(x, Q^2) \equiv \frac{1}{Y_+} \frac{Q^4}{2\pi\alpha^2} \frac{dx}{dQ^2} \frac{d^2\sigma_{NC}}{dx dQ^2} = F_2 (1 + \Delta_{F_2} + \Delta_{F_3} + \Delta_{F_L})$$

DIS bei hohen Q^2



--- $\sigma(e^-p) \sim x(u+c) + (1-y^2)x(d+s)$

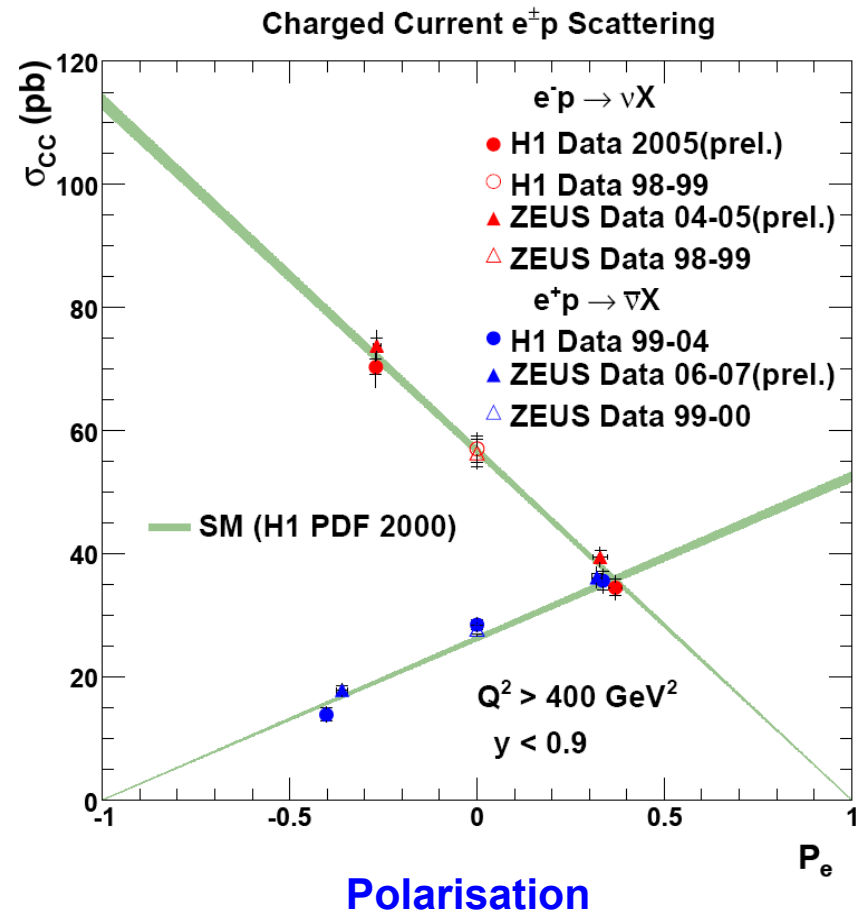
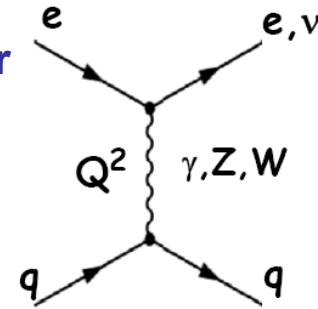
--- $\sigma(e^+p) \sim x(\bar{u}+\bar{c}) + (1-y^2)x(\bar{d}+\bar{s})$

QCD x EW

Extrapolation zu hohen Q^2 funktioniert

P. Schleper, QCD bei HERA und LHC

NC kleine Q^2 : $1/Q^4$ γ Propagator
 Hohe Q^2 : $M(Z,W) < Q$
 Propagators $\approx 1/Q^4$
 Elektroschw. Vereinigung
 der Prop.



Faktorisierung

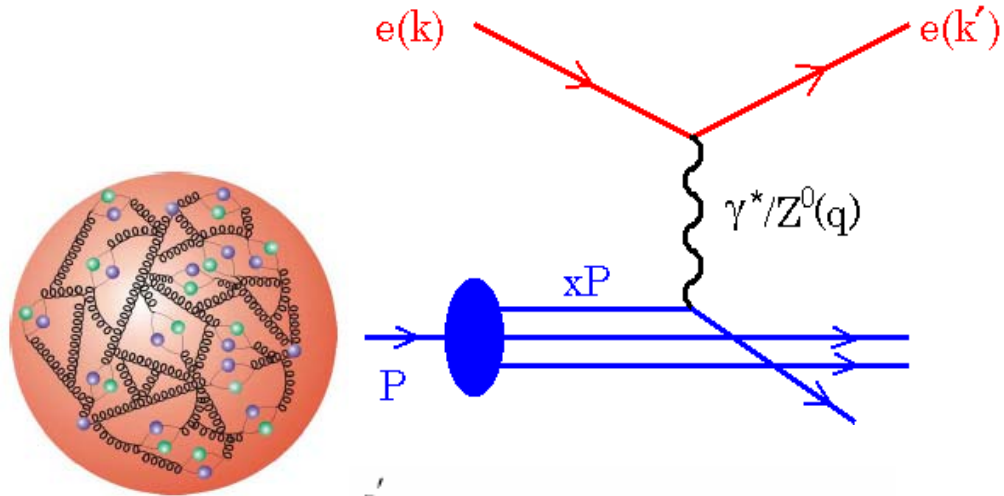
Asymptotisch freie Partonen

- **Fluktuation $P \approx \text{Parton} + \text{Rest}$**
mit Lebensdauer $\tau_{\text{virt}} \approx 1 / \Delta E$
- **Zeitdauer der ep WW**

$$\tau_\gamma \approx 1 / Q$$

$$Q \gg \Delta E \rightarrow \tau_\gamma \ll \tau_{\text{virt}}$$

Momentaufnahme des Protons



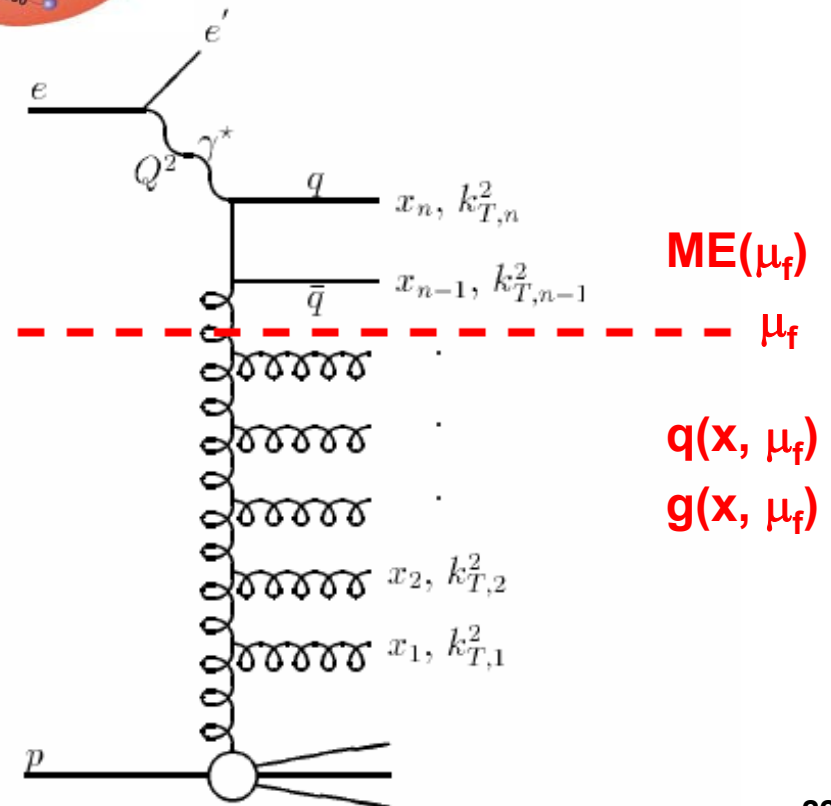
k_T Faktorisierung

Altarelli-Parisi Approximation (DGLAP)

Strenge Ordnung der QCD Kaskade nach k_T

$$Q^2 \gg k_{T,i} \gg k_{T,i-1} \dots$$

$$\sigma = \sum \hat{\sigma} \times f_q$$



Faktorisierungsskala μ_f

Abstrahlungen mit $k_T > \mu_f \rightarrow \text{ME}$

$k_T < \mu_f \rightarrow$ Parton-Dichten

DGLAP Evolution

P_{ij} : Splitting-Funktionen

- Wahrscheinlichkeit, dass Parton j kollinear ein Parton i abstrahlt mit Impulsbruchteil x



$$F_2(x, Q^2) = x \sum_{a=q, \bar{q}} e_q^2 \int_x^1 \frac{d\xi}{\xi} f_a(\xi, \mu_f^2) \left[\delta\left(1 - \frac{x}{\xi}\right) + \frac{\alpha_s(\mu_f)}{2\pi} \left[P_{qq}\left(\frac{x}{\xi}\right) \ln \frac{Q^2}{\mu_f^2} + (C_2^q - z_{qq}) \left(\frac{x}{\xi}\right) \right] \right]$$

$d F_2 / d \ln \mu_f = 0$ Observable darf nicht von μ_f abhängen



mit z.B.

$$P_{qq}(z) = \frac{4}{3} \left[\frac{1+z^2}{1-z} \right]$$

calculable in pQCD

$$\frac{d}{d \ln \mu} \begin{pmatrix} q(x, \mu) \\ g(x, \mu) \end{pmatrix} = \int_x^1 \frac{dz}{z} \begin{pmatrix} P_{qq} & P_{qg} \\ P_{gq} & P_{gg} \end{pmatrix}_{(z, \alpha_s)} \cdot \begin{pmatrix} q(x/z, \mu) \\ g(x/z, \mu) \end{pmatrix}$$

QCD Fits der Parton- Dichten im Proton

Suche $q(x, Q^2)$, $g(x, Q^2)$ mit $q = u, d$ Valenzquarks und u, d, s See-Quarks

x-Abhängigkeit: nicht berechenbar in pQCD,

wähle Parametrisierungen bei kleinen $Q_0^2 \approx 5 \text{ GeV}^2 \rightarrow \text{ca. 15 Parameter}$

Q2- Abhängigkeit: Vorhersage durch DGLAP Gleichungen in LO, NLO, NNLO

Berechne $q(x, Q^2)$, $g(x, Q^2)$ aus $q(x, Q_0^2)$, $g(x, Q_0^2)$

Beachte Summenregeln

Berechne Observable bei Skala Q^2 $\sigma = \sum_q q(x, Q^2) \otimes \hat{\sigma}$

Prozesse: DIS, Drell-Yan, Tevatron jets, W, ... konsistente theoretische Beschreibung ?

Vergleich mit Experiment- Daten: χ^2 Test, einschliesslich aller Systematik

Iteriere Start-Parameter bei Q_0^2

Summenregeln für Quantenzahlen:

2 u-Quarks

$$\int_0^1 [u(x) - \bar{u}(x)] dx = 2,$$

1 d-Quark

$$\int_0^1 [d(x) - \bar{d}(x)] dx = 1,$$

kein s-Quark

$$\int_0^1 [s(x) - \bar{s}(x)] dx = 0$$

Summenregel für Impuls:

$$\int_0^1 \left[\sum_i (q_i(x) + \bar{q}_i(x)) + g(x) \right] x dx = 1$$

QCD Fits der Parton- Dichten

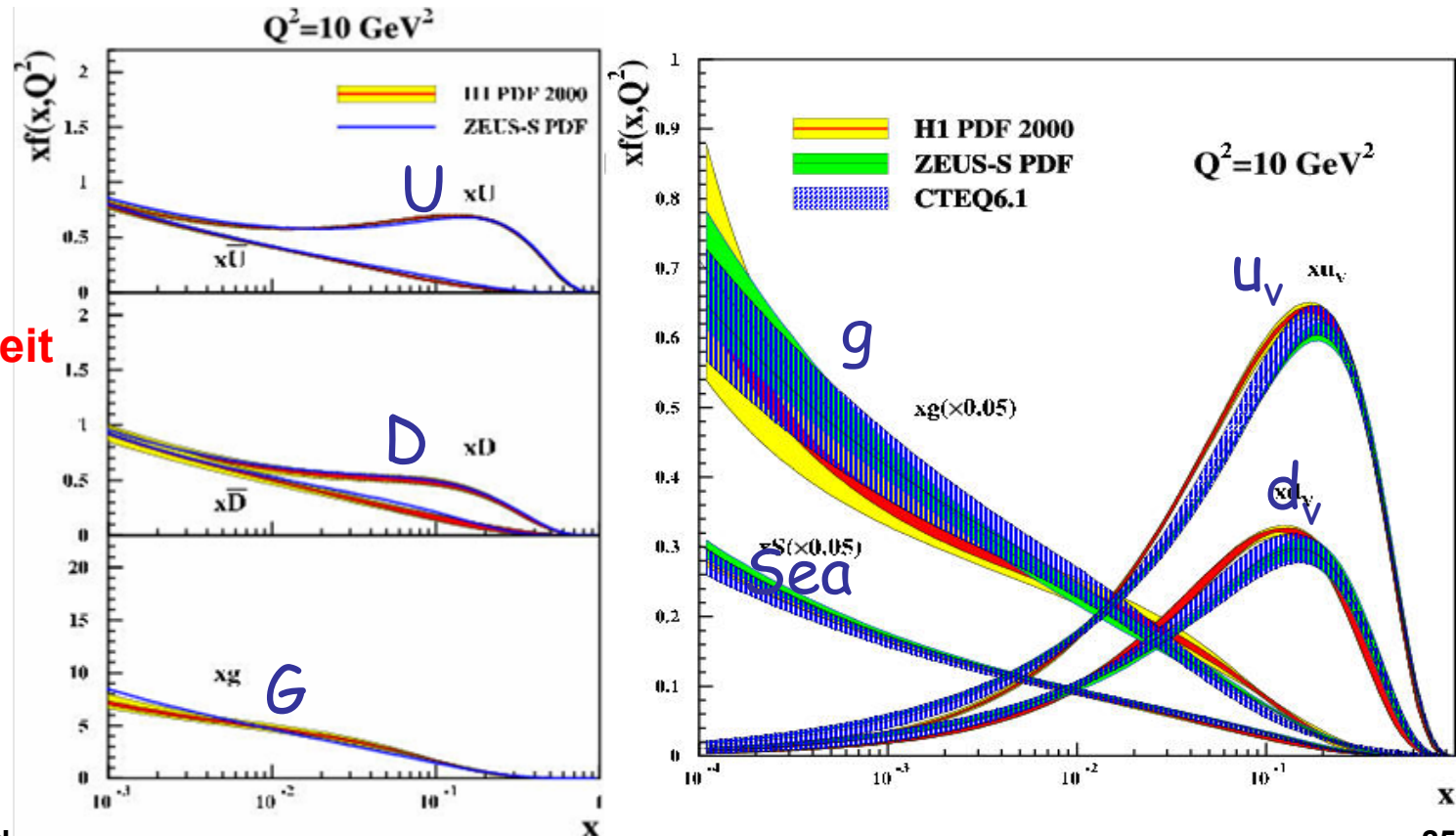
Fit nur an inklusive DIS Daten:

theoretisch sehr gut definiert (H1,ZEUS,Alekhin),
teilweise nur HERA Daten (H1, ZEUS), teils auch mit Jets

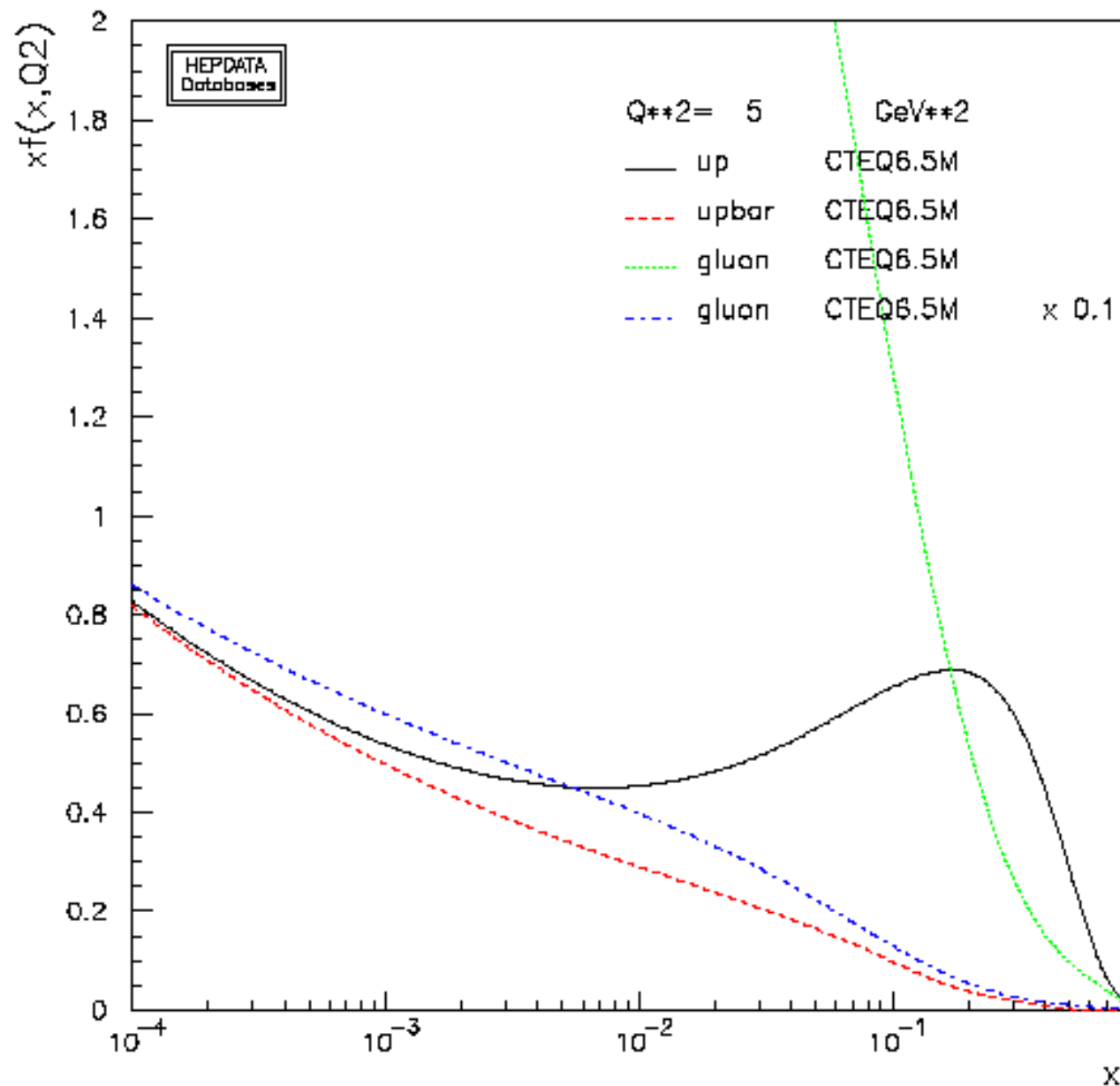
Globale fits:

viele Prozesse: inklusive DIS, Drell-Yan, Tevatron: jets,W/Z (CTEQ,MRST,...)
bessere Bestimmung aller Unbekannten ?

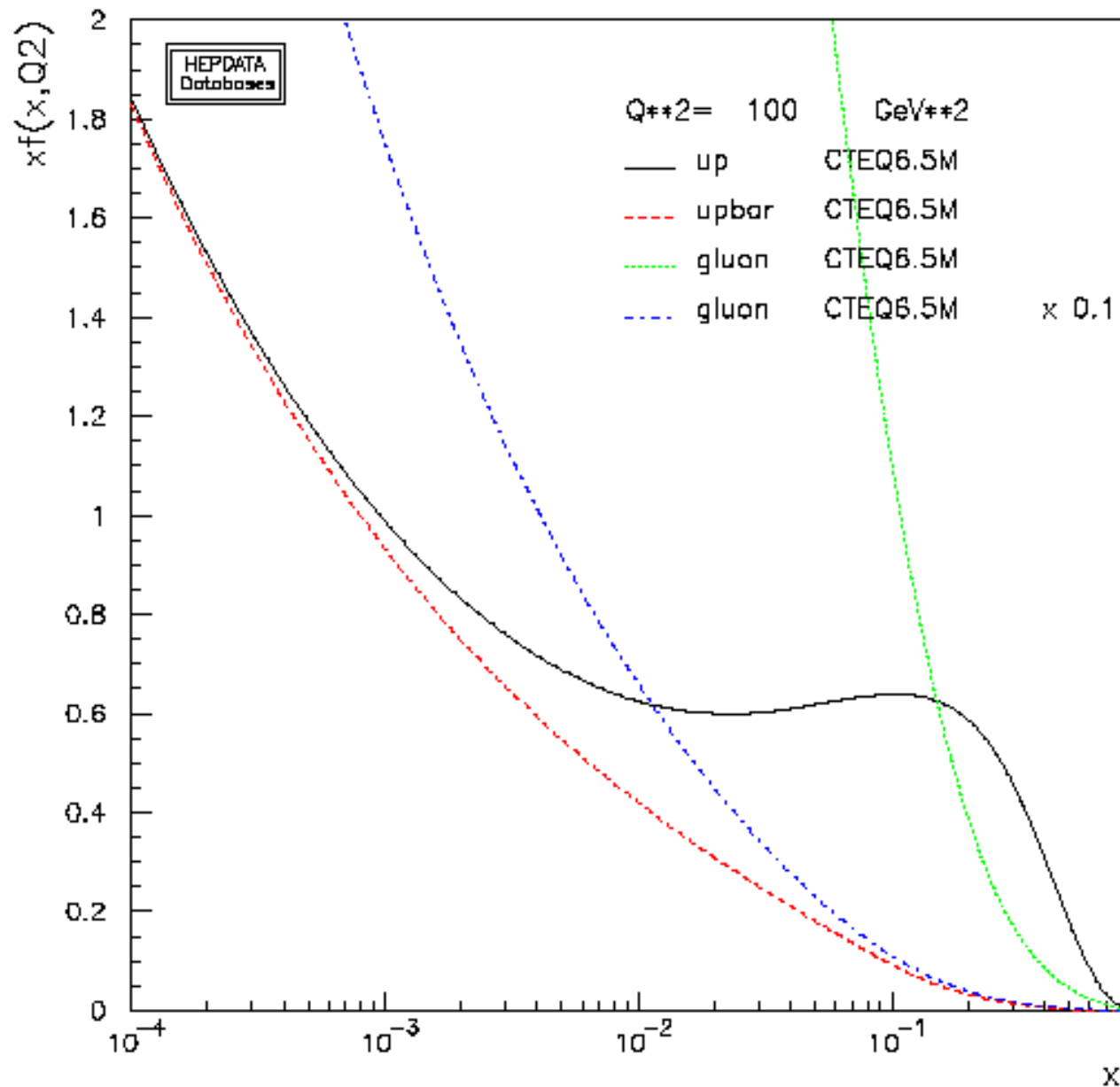
Zeus/H1 fits
nur an HERA Daten
→ Ähnliche Genauigkeit
wie Globale Fits



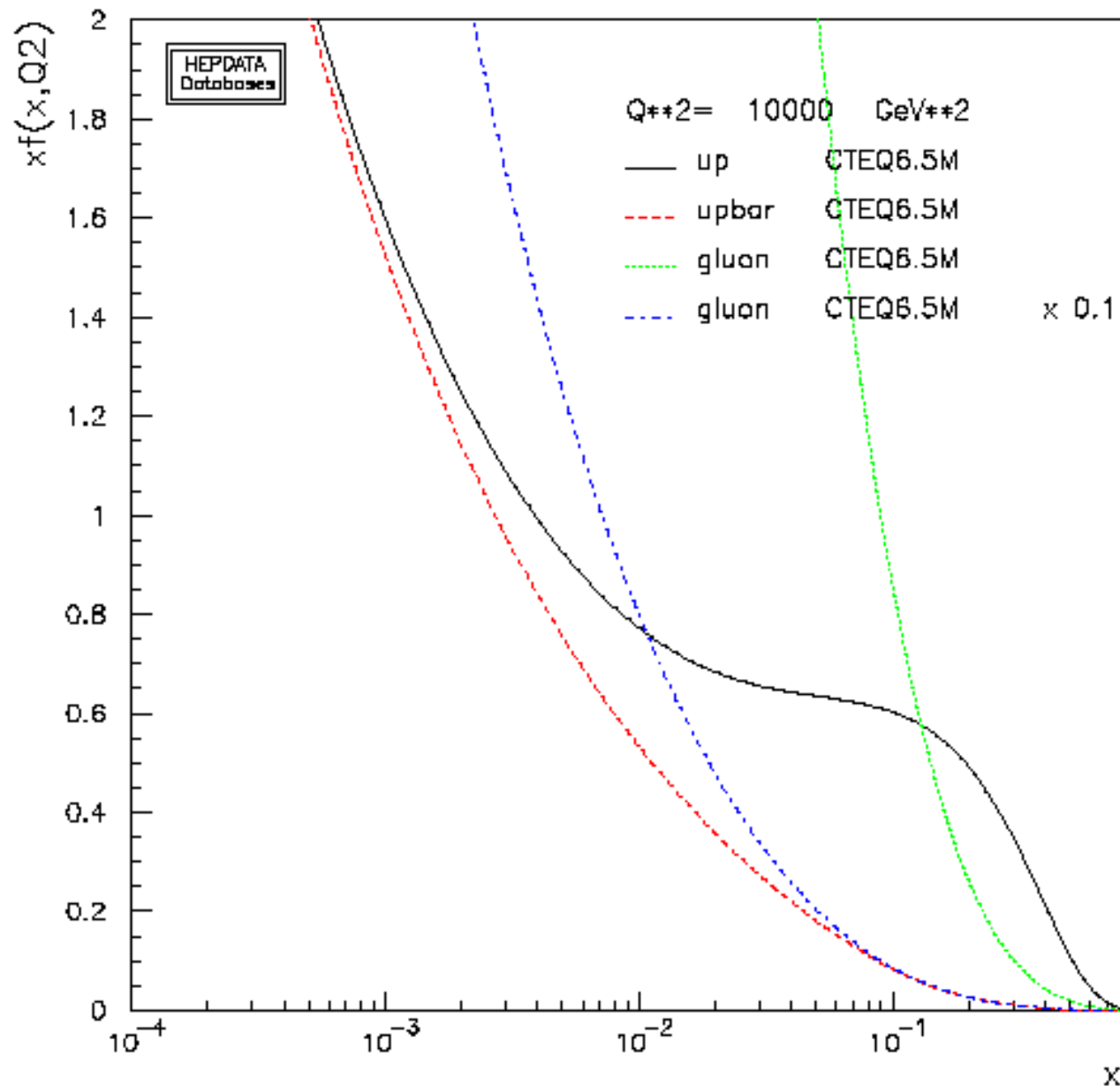
Parton Dichten bei 5 GeV²



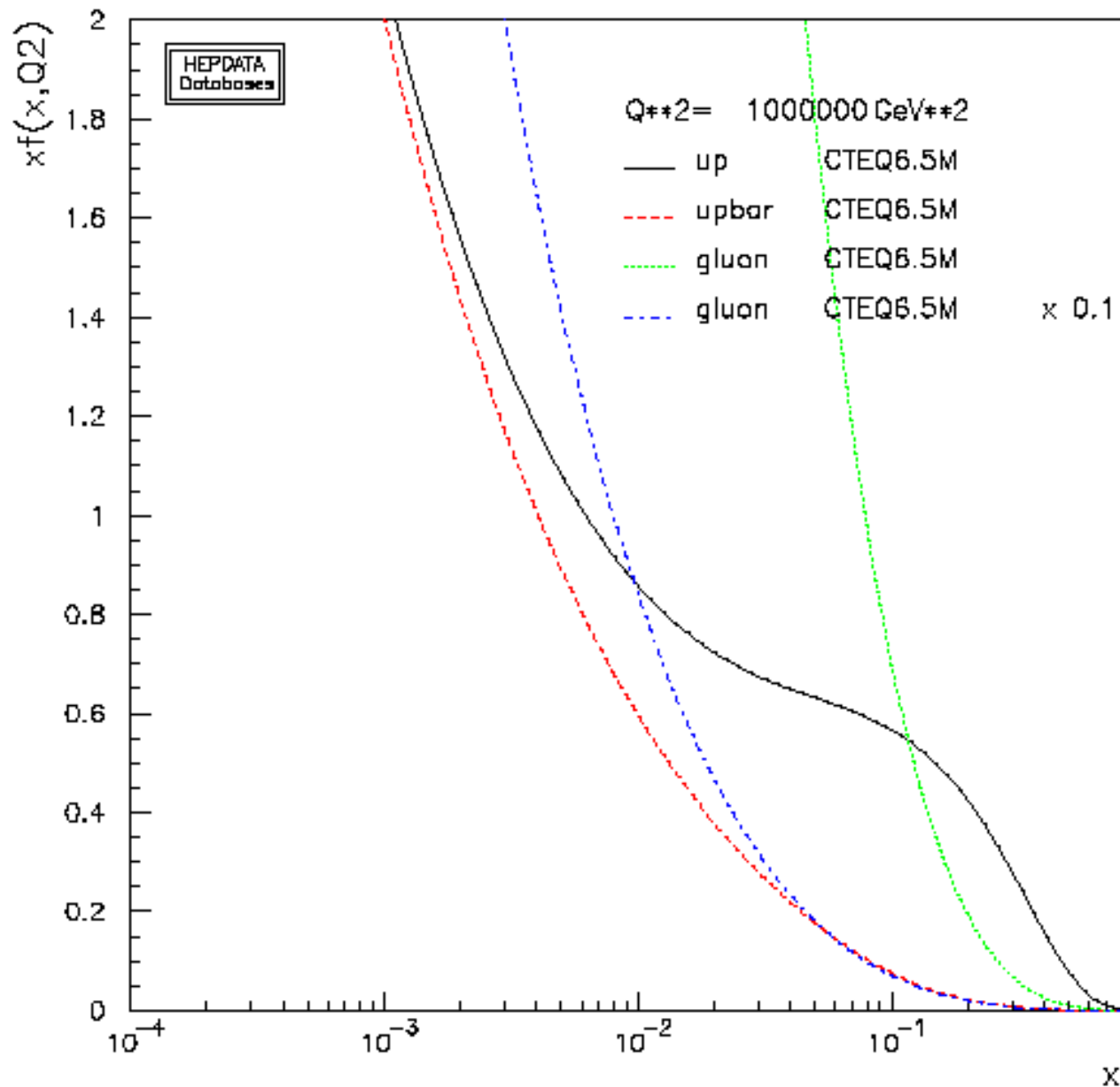
Parton Dichten bei 100 GeV²



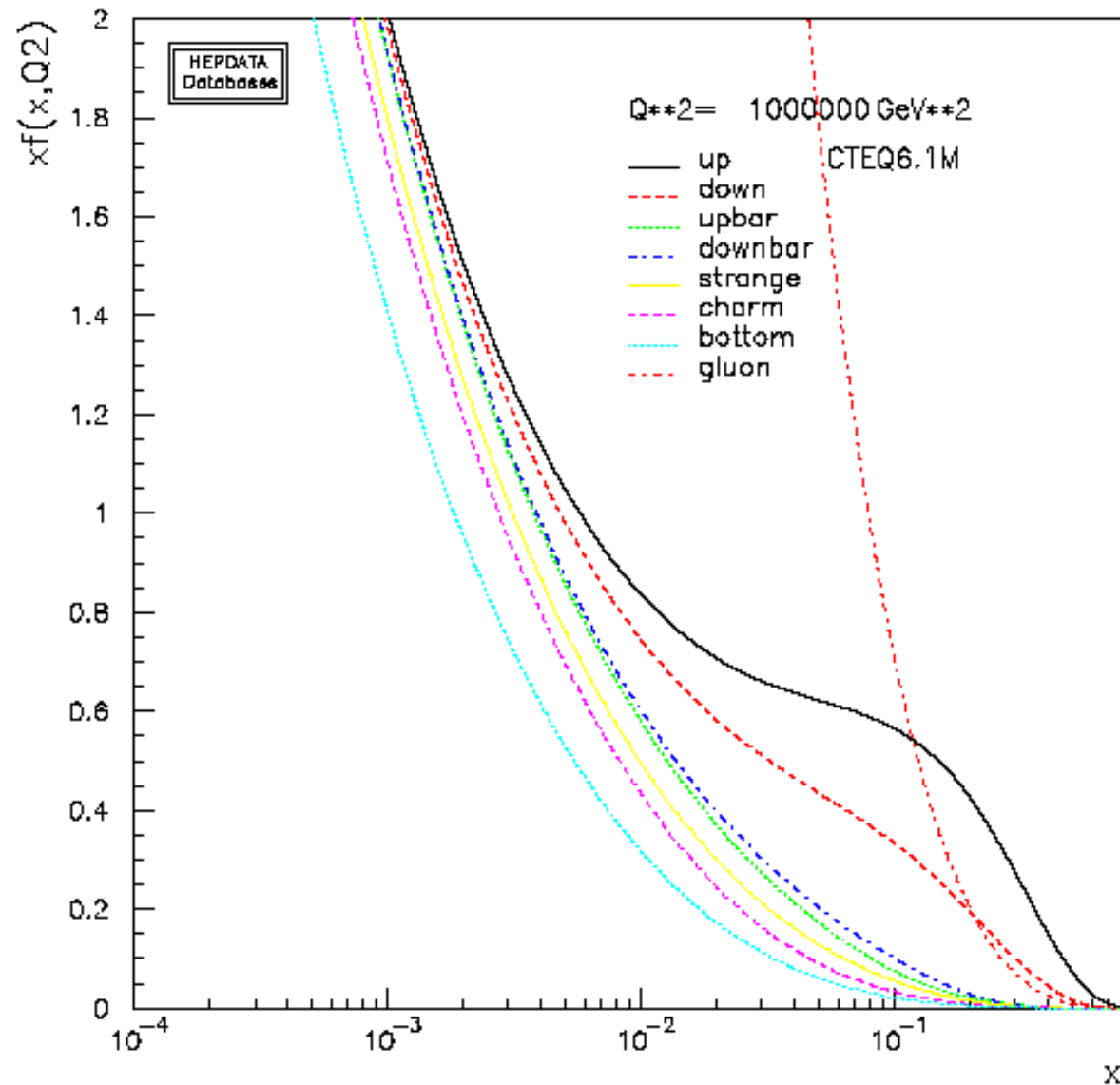
Parton Dichten bei 10000 GeV²



Parton Dichten bei 1 TeV²

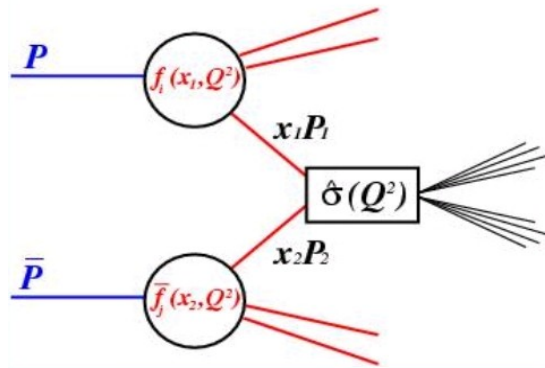


Parton Dichten bei 1 TeV



LHC Partonen & Luminosität

Factorization



$$\sigma = \sum_{i,j} \int_0^1 dx_1 dx_2 f_i(x_1, \mu) f_j(x_2, \mu) \hat{\sigma}_{ij}$$

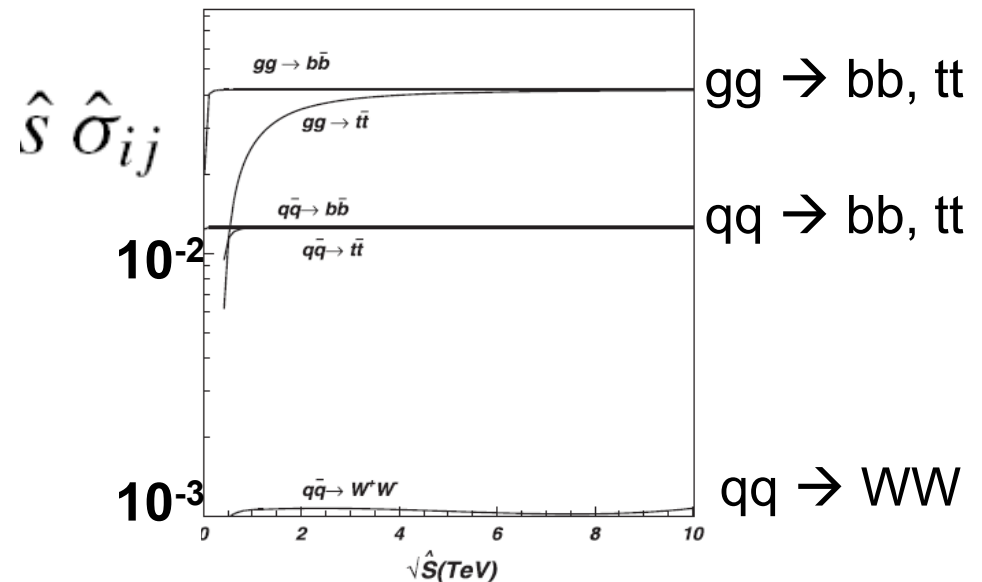
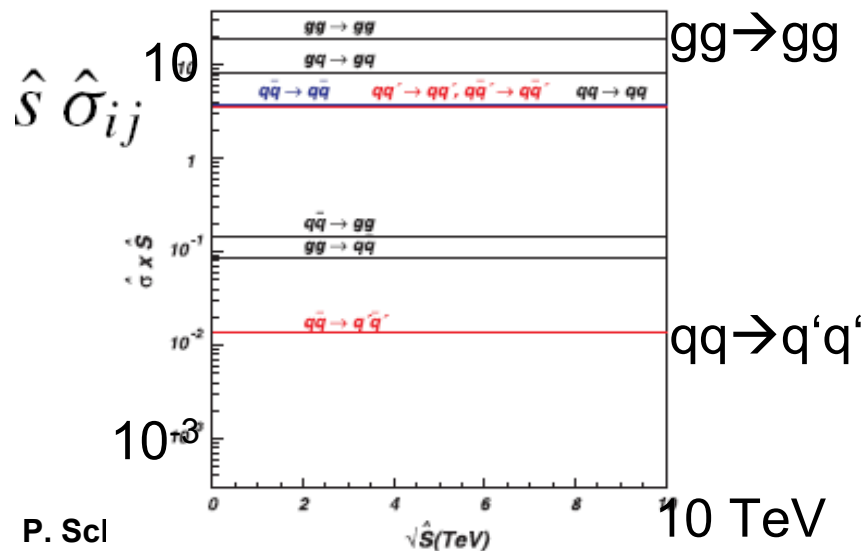
$$\sigma = \sum_{i,j} \int \left(\frac{d\hat{s}}{\hat{s}} dy \right) \left(\frac{dL_{ij}}{d\hat{s} dy} \right) (\hat{s} \hat{\sigma}_{ij})$$

Parton- Luminosität:

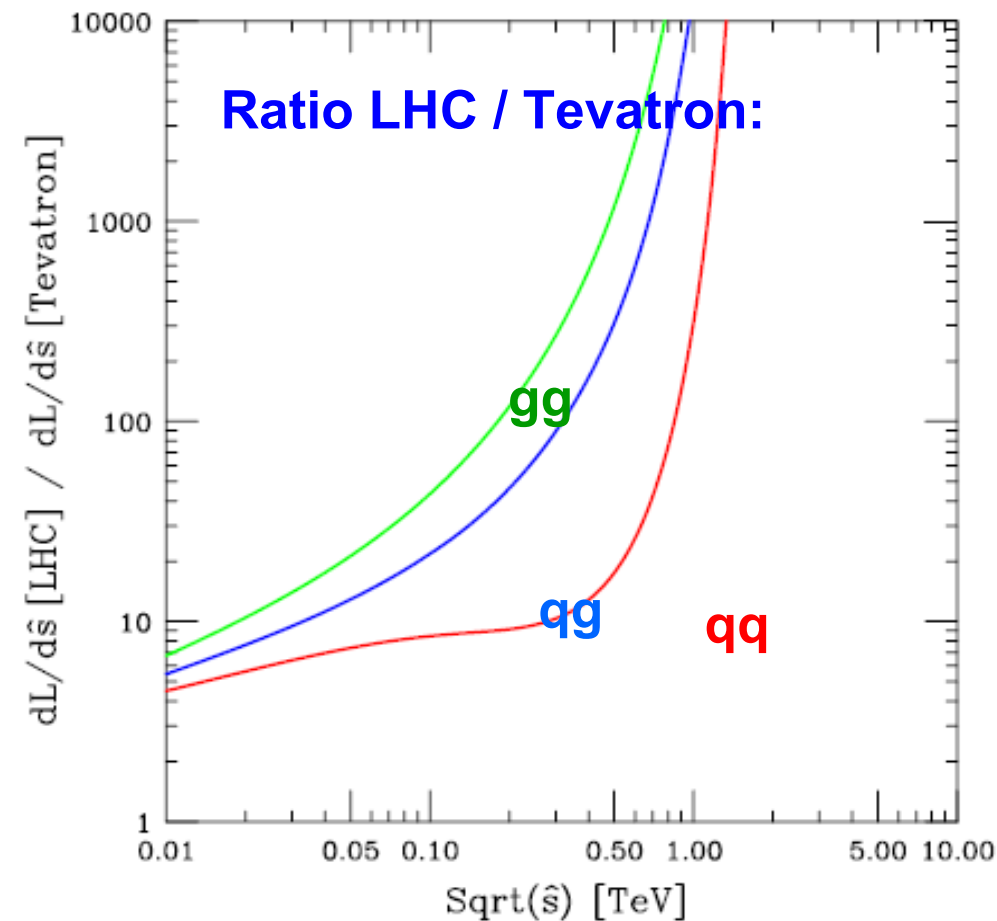
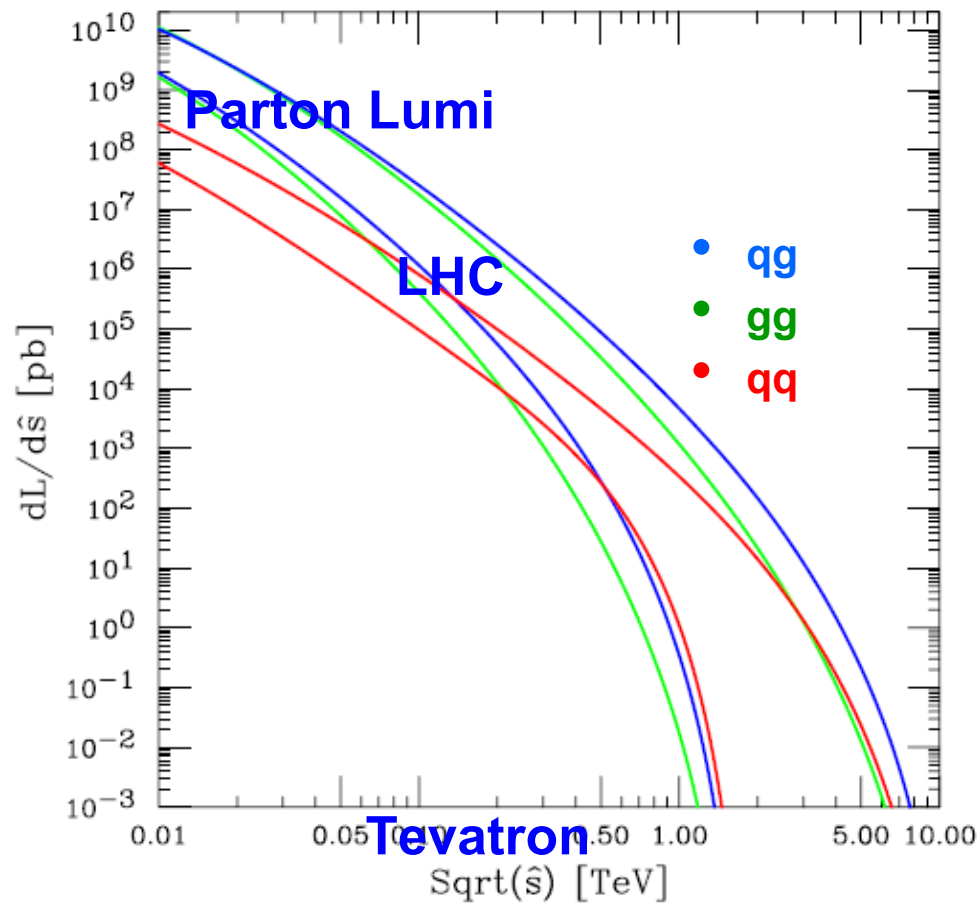
$$\frac{dL_{ij}}{d\hat{s} dy} = \frac{1}{s} \frac{1}{1 + \delta_{ij}} [f_i(x_1, \mu) f_j(x_2, \mu) + (1 \leftrightarrow 2)].$$

Parton- Wirkungsquerschnitt:

$$\hat{s} \hat{\sigma}_{ij} = 10^{-3} \dots 20$$



Parton- Luminosität bei LHC & Tevatron



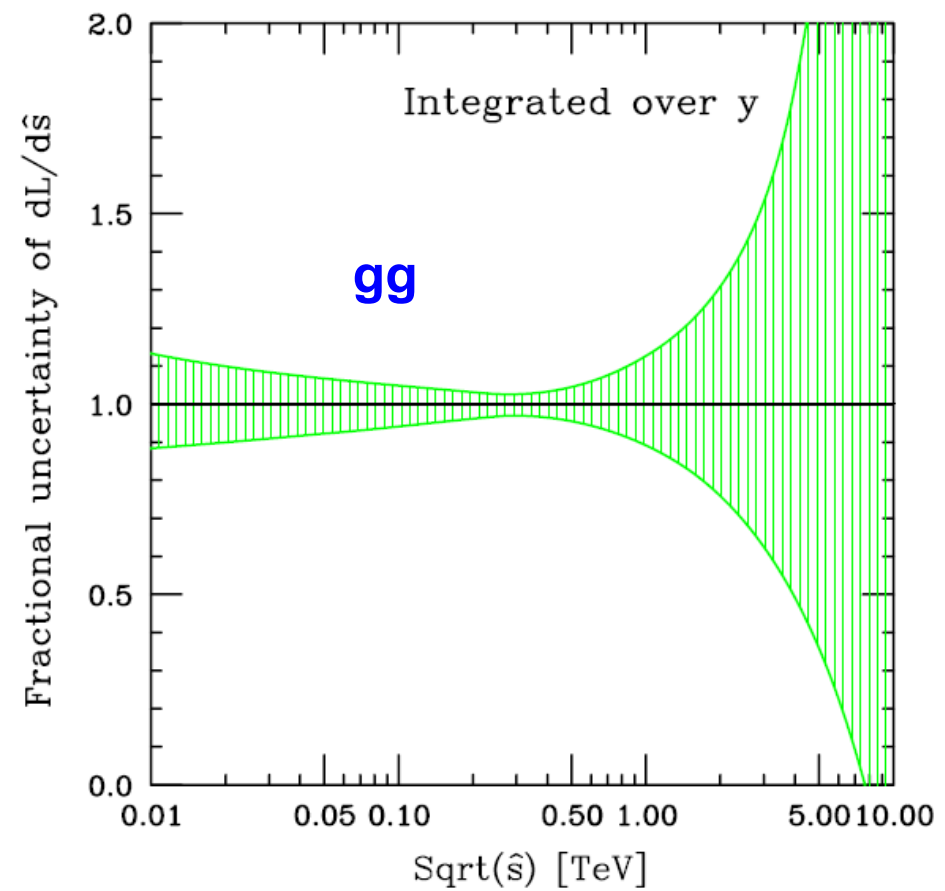
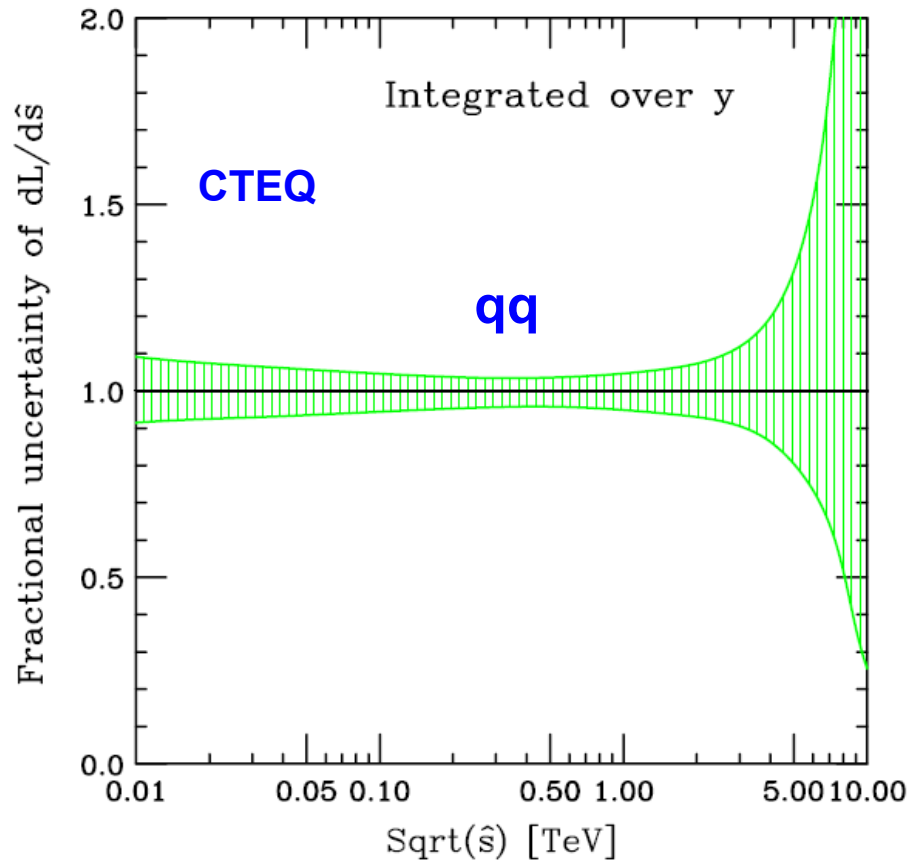
LHC: Gluon dominiert Parton-Lumi und QCD ME

LHC / Tevatron: Faktor 40 for $gg \rightarrow H$ @ $M_H = 120$ GeV

Faktor 10000 for $gg \rightarrow XX$ @ $M_X = 0.5$ TeV

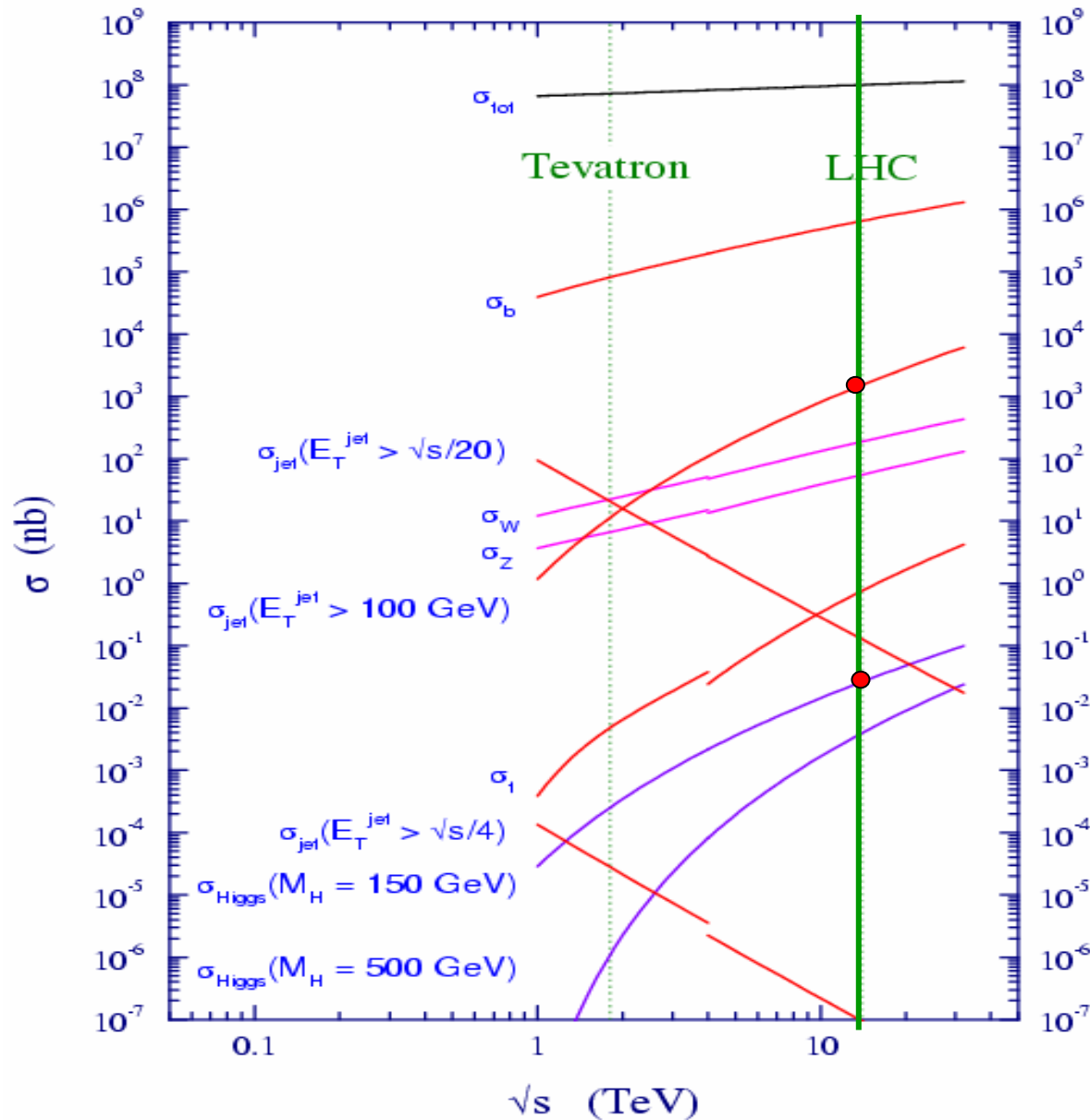
Unsicherheit der Parton- Luminosität

- Experimentelle Fehler
- Verschiedene Fit-Parametrisierungen
- Konsistenz der Datensätze
- theoretische Unsicherheiten



- 5 – 10 % Fehler bis 2 TeV
- Keine Vorhersagekraft für gg Prozesse über ~ 3 TeV

LHC Vorhersagen



**10^8 Ereignisse pro Sek.
@ $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$**

**1000 Jets / s ($E_T > 100$)
200 W / s 50 Z^0 / s**

1 ttbar / s

1 Higgs / min $M_H = 150 \text{ GeV}$

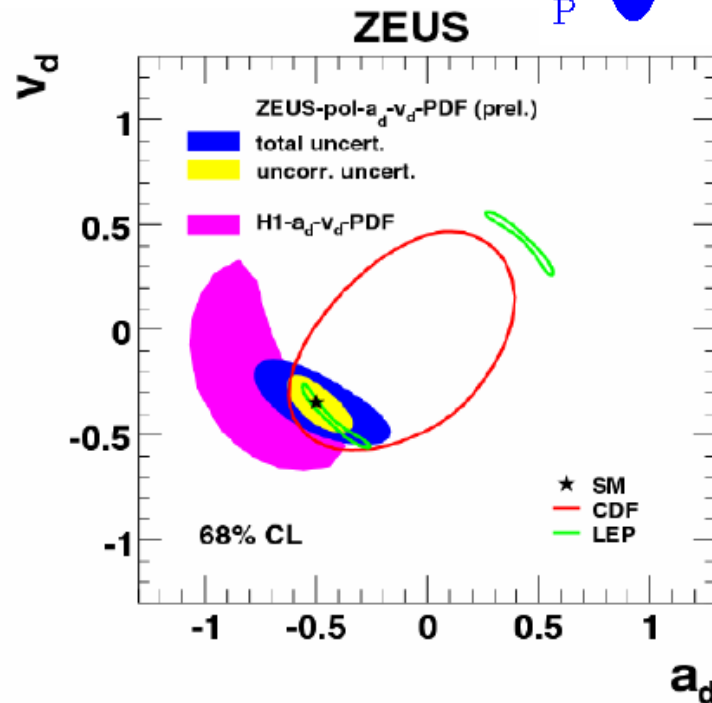
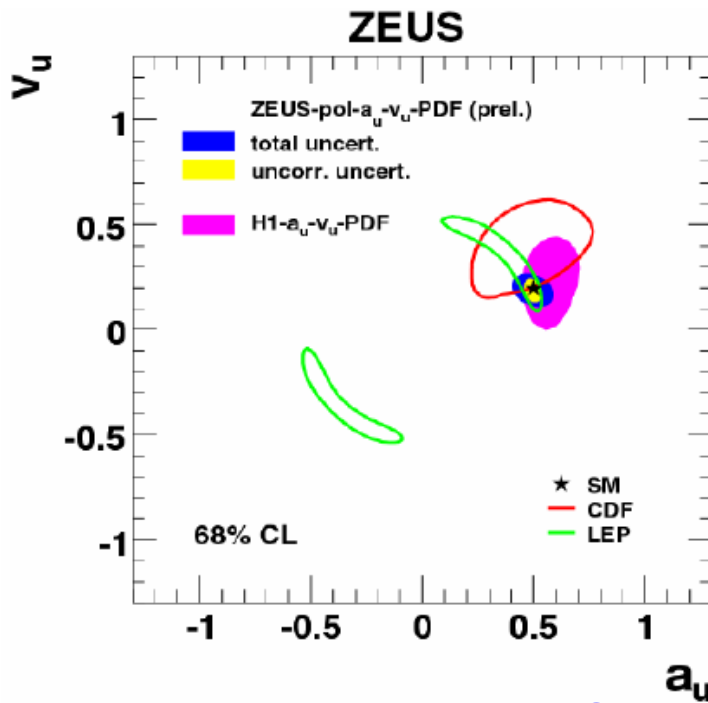
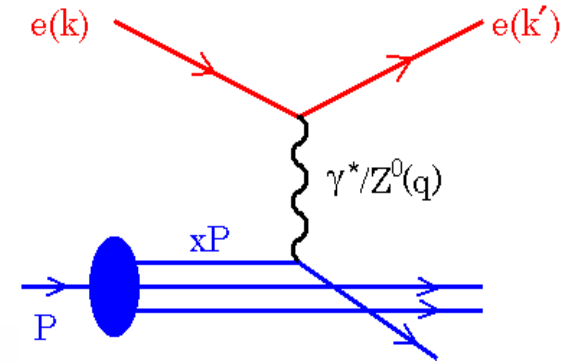
- Riesige Ereignissraten für SM Prozesse aufgrund hoher Gluon-Dichte bei kleinen x
- Jets $\gg$ W, Z, t, H

TEST der QCD Fits:

HERA: Messung Elektroschwacher Parameter

Gleichzeitiger Fit von

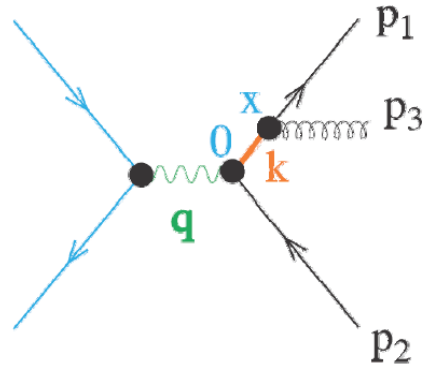
- Parton-Dichten und
- Elektroschwachen Parametern:
Kopplung Z an leichte Quarks: a_u, v_u, a_d, v_d



u : Verbesserte Genauigkeit gegenüber LEP

u, d Kopplungen konsistent mit Standard Model

Hadronischer Endzustand: Infrarote Divergenzen



Propagator: $k^2 \approx 2 E_1 E_3 (1 - \cos \theta_{13})$

ME $\sim 1 / k^2$ divergiert für $k^2 \rightarrow 0$ (große Reichweite)

- Kollineare Divergenz : $\theta_{13} \rightarrow 0$ P_1 parallel P_3
- Weiche Divergenz: $E_3 \rightarrow 0$ „soft Gluon“

Rechnung:

Divergenzen in

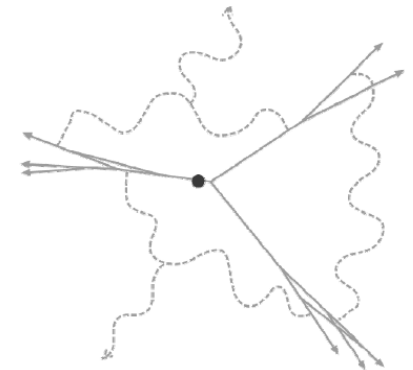
- Emission realer Gluonen (in LO)
- virtuellen Korrekturen (in NLO)

heben sich gegenseitig auf.

→ Kollimierte Jets

→ Weiche Partonen

zwischen den Jets



Experiment & Theorie:

Infrarot sichere Observable: keine Änderung der Observablen bei

- Aufspaltung eines Partons in zwei kollineare Partonen mit gleicher Gesamtenergie
- Emission weicher Gluonen

Infrarot sichere Observable

Inklusive Wirkungsquerschnitte:

keine Abhängigkeit von Details des Endzustands

- $e^+ e^- \rightarrow \text{Hadronen, Thrust, ...}$
- $e p \rightarrow e' X$ inklusive DIS

Jet- Algorithmen :

Durham / k_T (infrarot sicher)

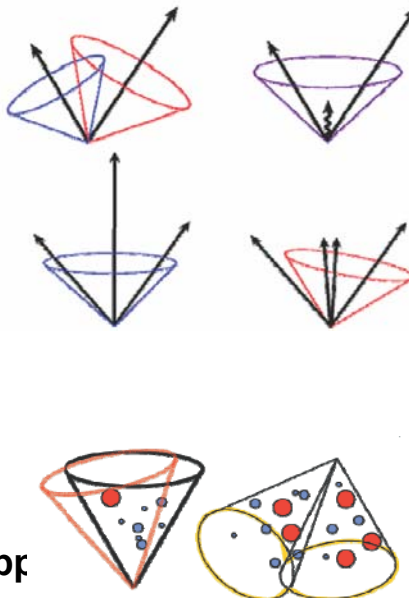
$$M_{ij}^2 = 2 \min(E_i^2, E_j^2) (1 - \cos \theta_{ij})$$
$$\approx \min(k_{Ti}^2, k_{Tj}^2)$$

Iterative Cone Algorithmus

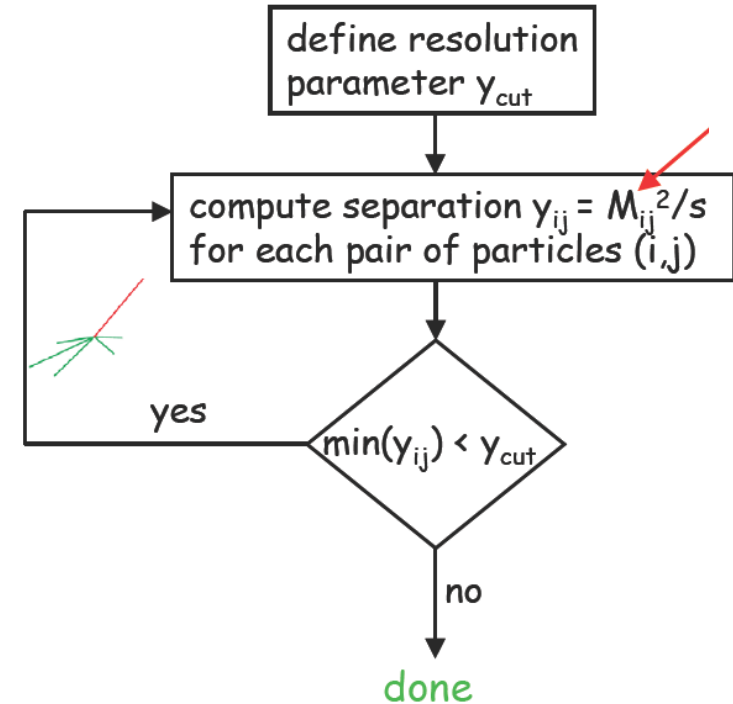
Addiere Energien zu „seeds“ innerhalb

$$R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$$

Iteriere, spalte / verbinde jets mit Überlapp



Jet- Algorithmen :



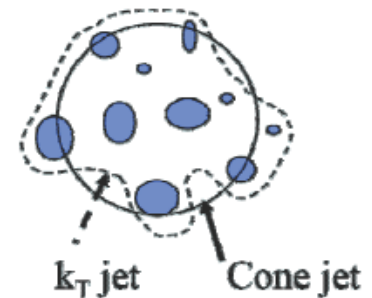
LEP, HERA:

k_T Algorithmus, da infrarot sicher

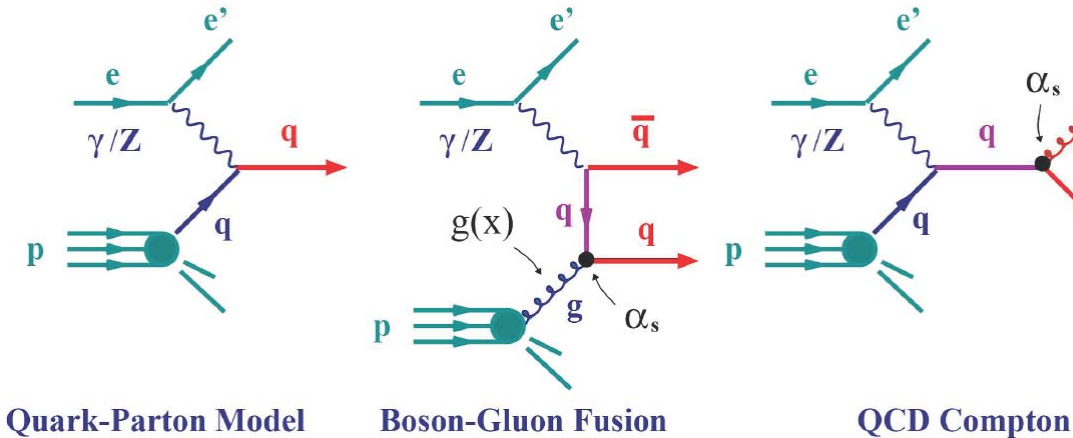
Tevatron / LHC:

Cone einfacher für Kalibration und Multi-Parton WW

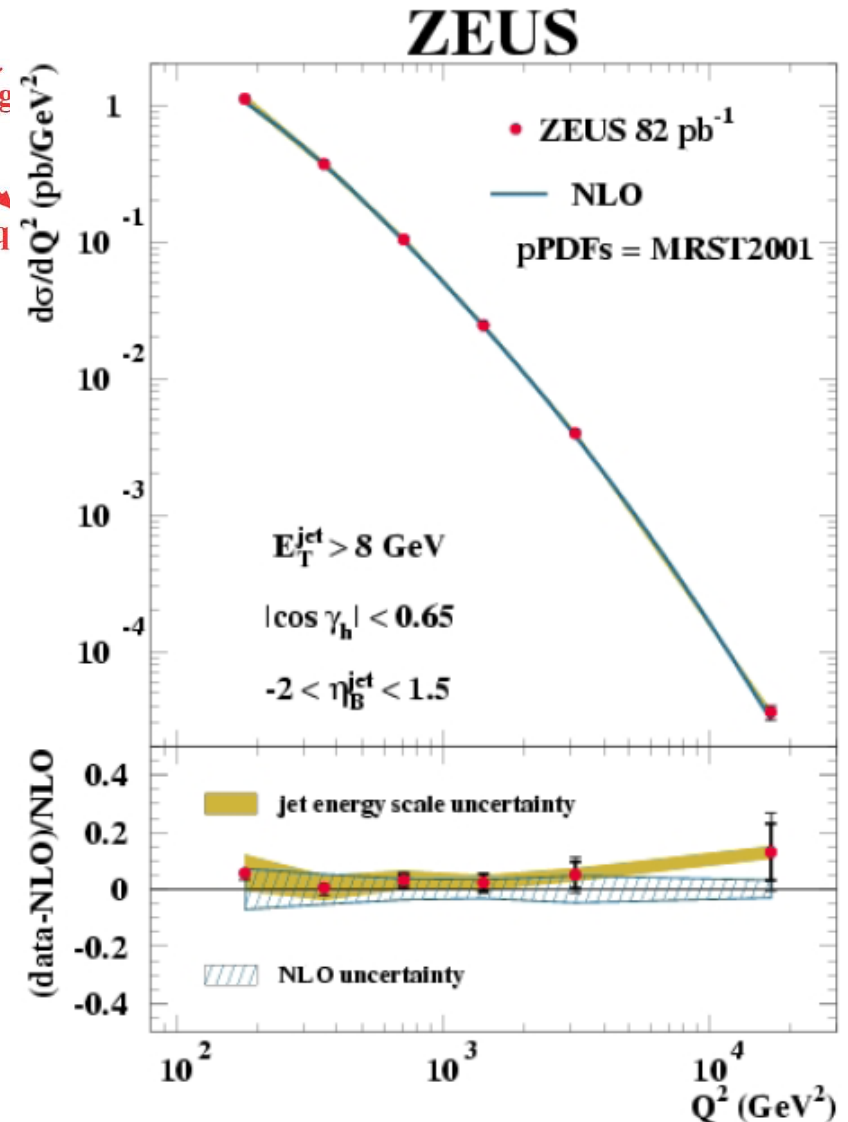
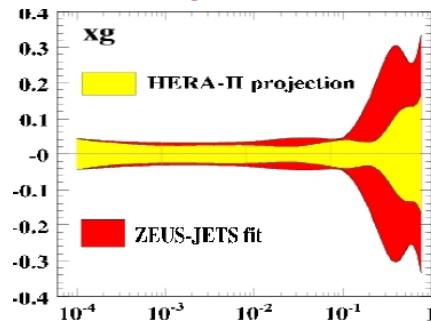
k_T ungeeignet zur Rekonstruktion schwerer Teilchen



Jet Produktion bei HERA

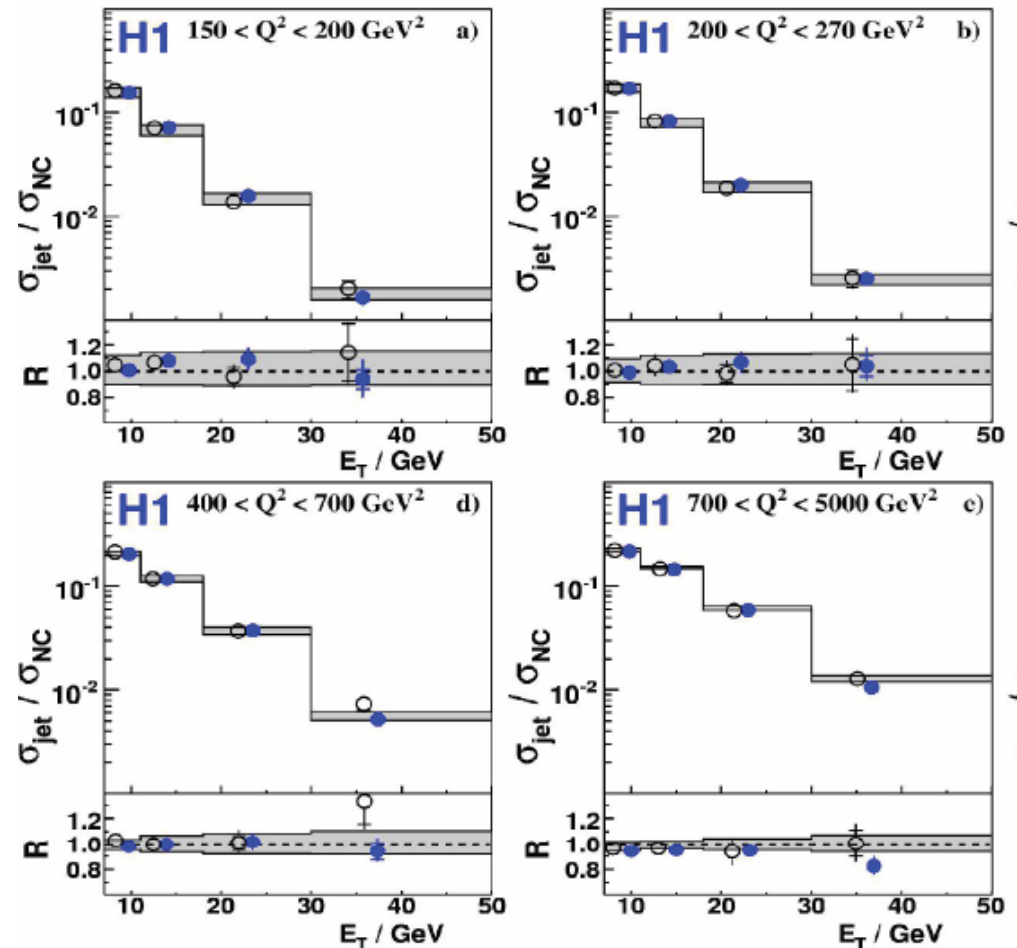
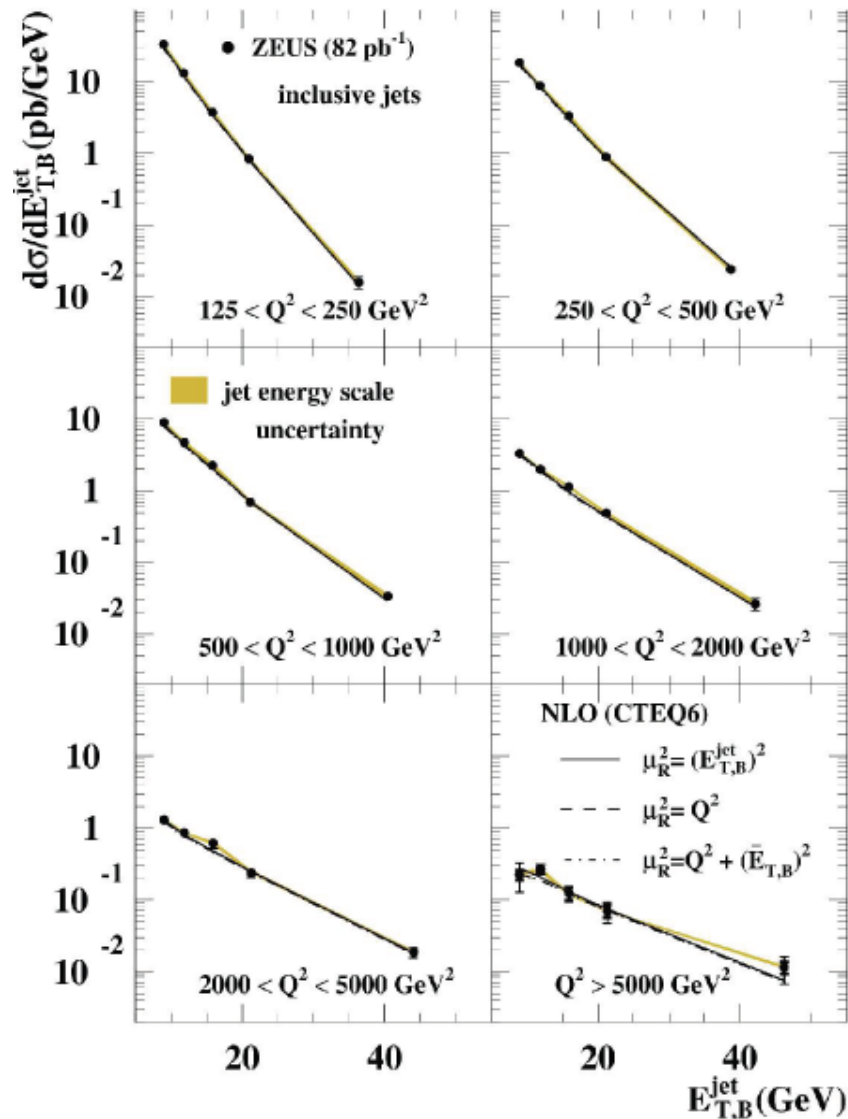


Test der QCD Faktorisierung
 Test der NLO Rechnungen für 2,3 Jets
 Abhängig von Quon-Dichte in LO
 → Messung von α_s und Gluon-Dichte



Prozess mit 2-Skalen: E_T, Q^2 → Variiere Wahl von μ_r, μ_f

Jet- Raten bei HERA

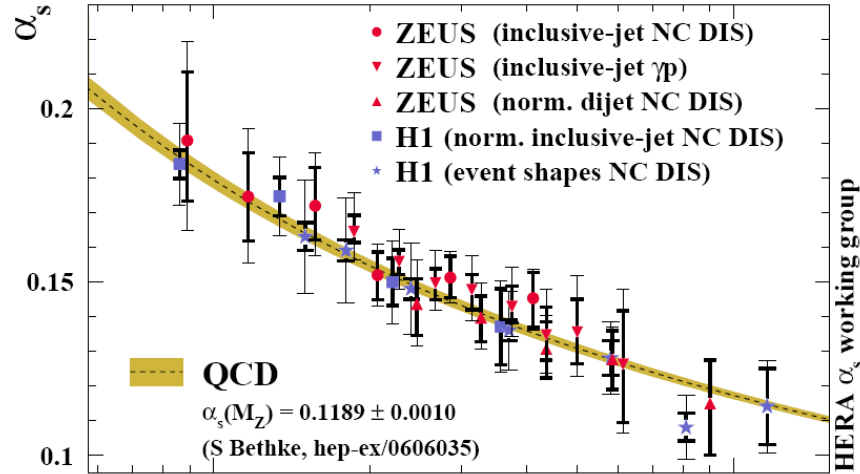


Daten nicht mehr statistisch limitiert

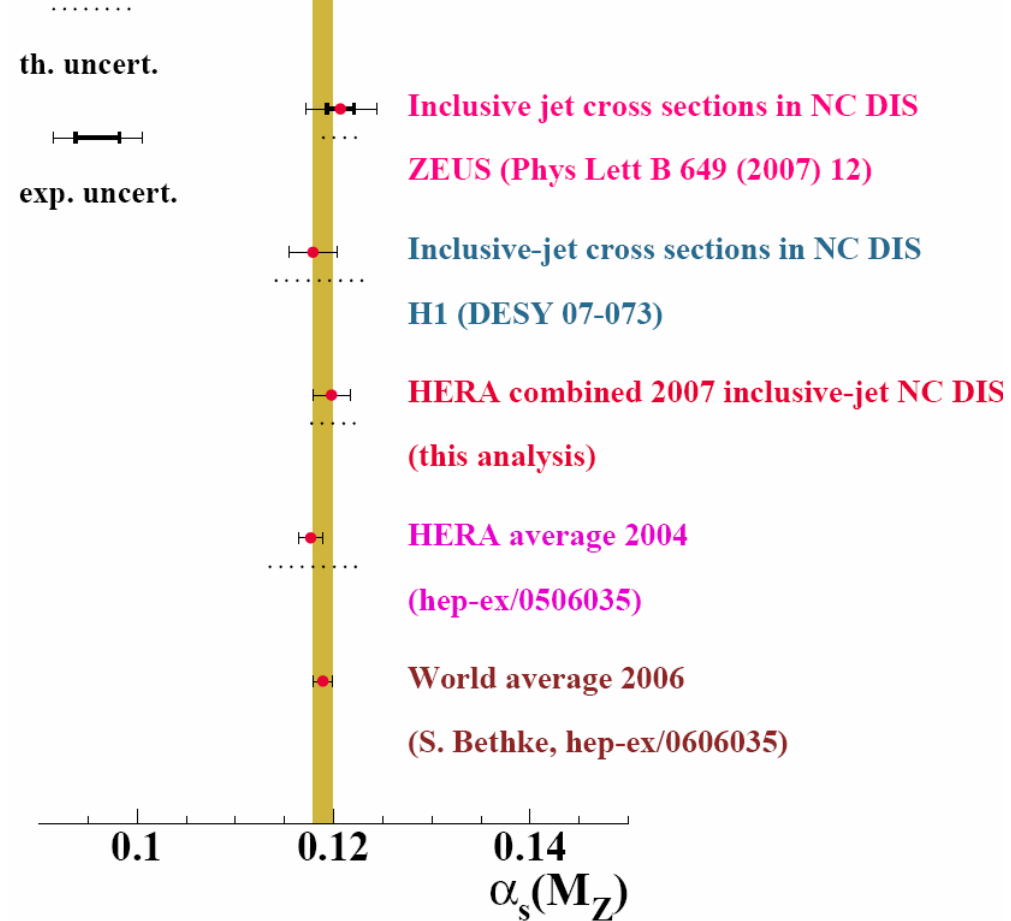
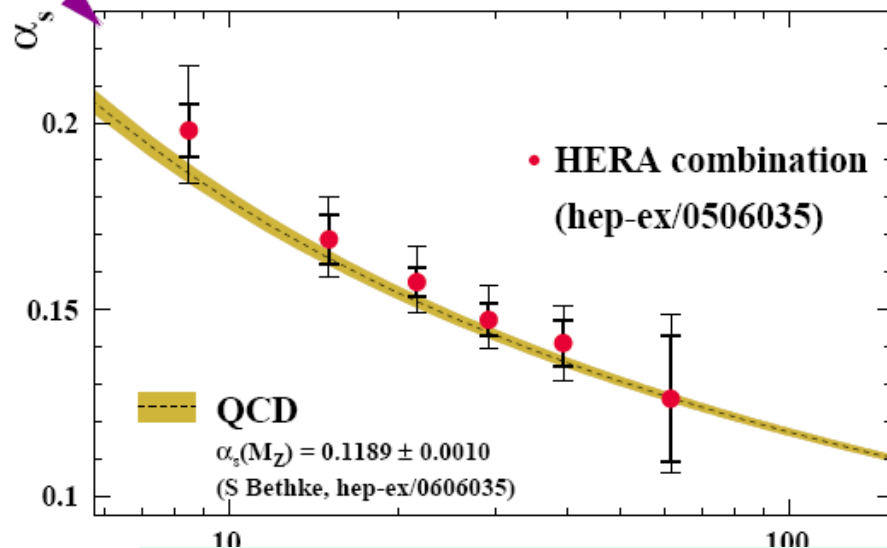
Erfolgreicher Test der Faktorisierung, PDFs, NLO

α_s Messungen bei HERA

HERA



HERA

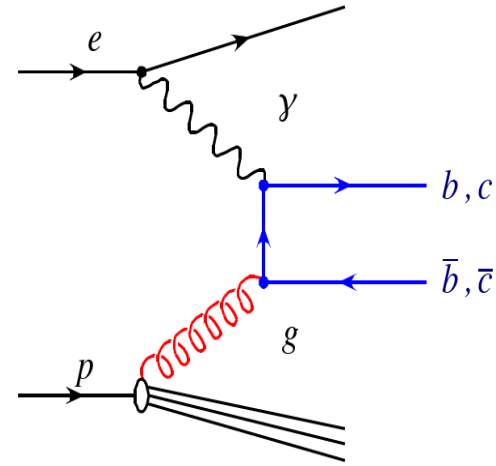
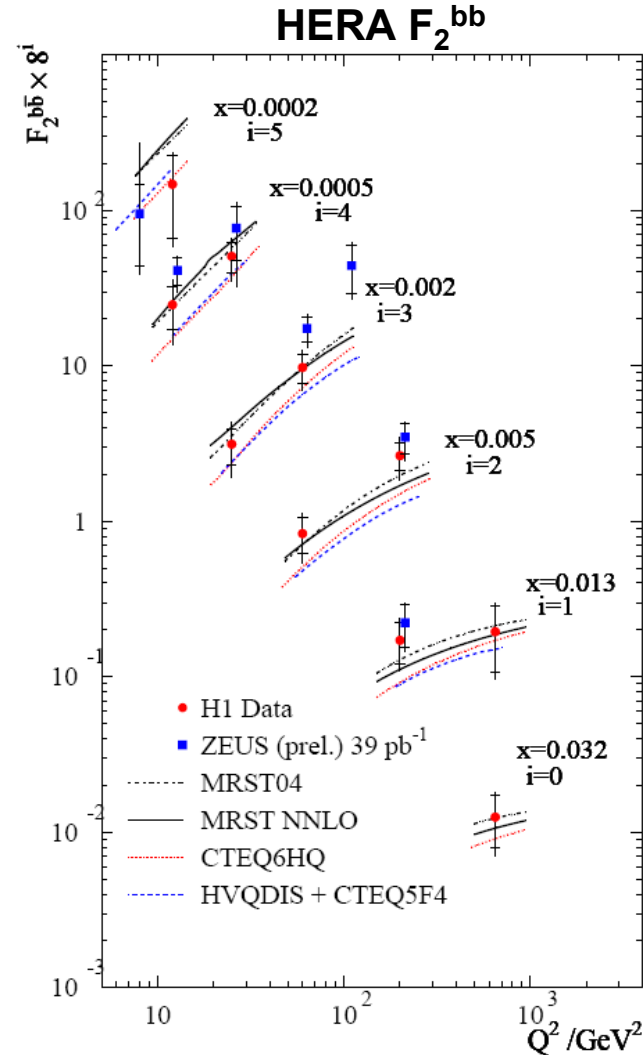
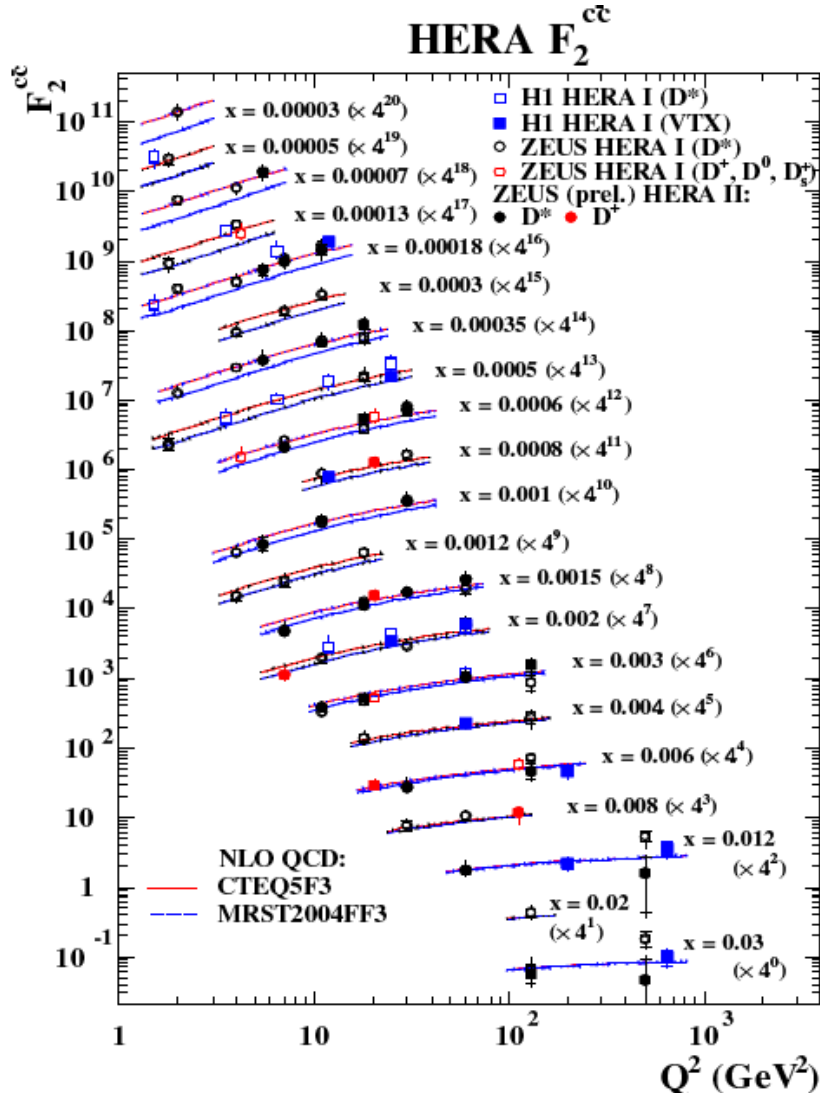


Für DIS-Jets: QCD o.k. innerhalb ~ 3.5 % !

Jets: $\alpha_s(M_Z) = 0.1198 \pm 0.0019$ (exp.) ± 0.0026 (th.)

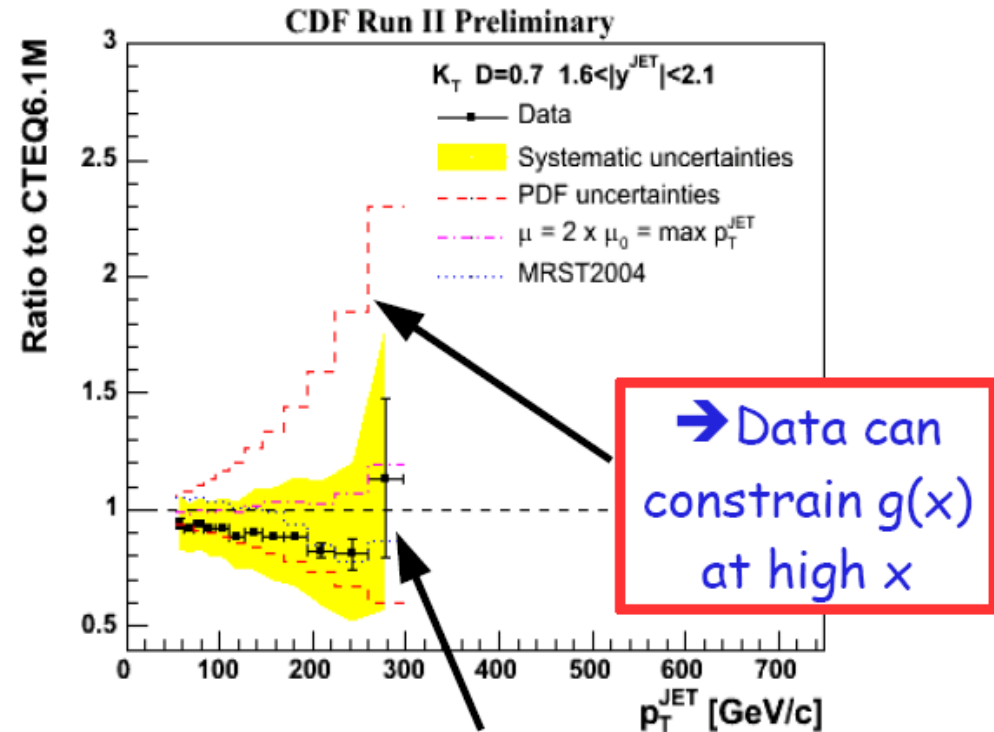
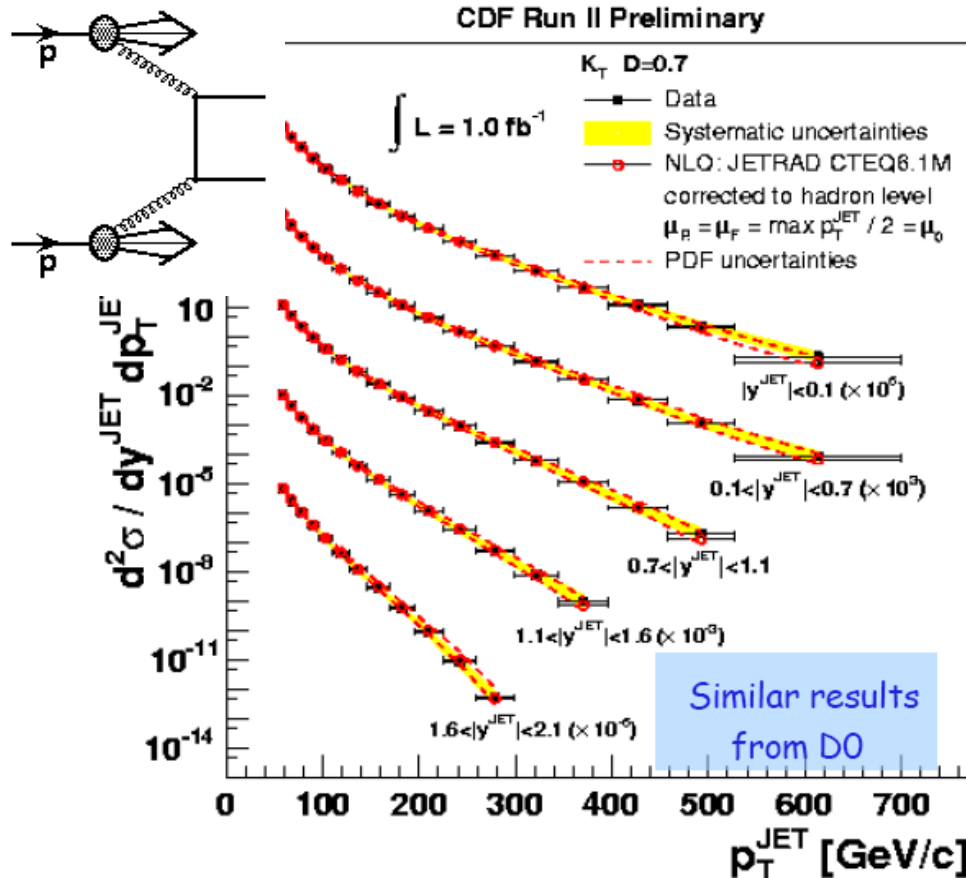
Charm & Bottom Produktion bei HERA

$\gamma g \rightarrow cc, bb$ Produktion $\sim g(x, Q^2)$ in führender Ordnung
Test der QCD Fits für Gluon-Dichte

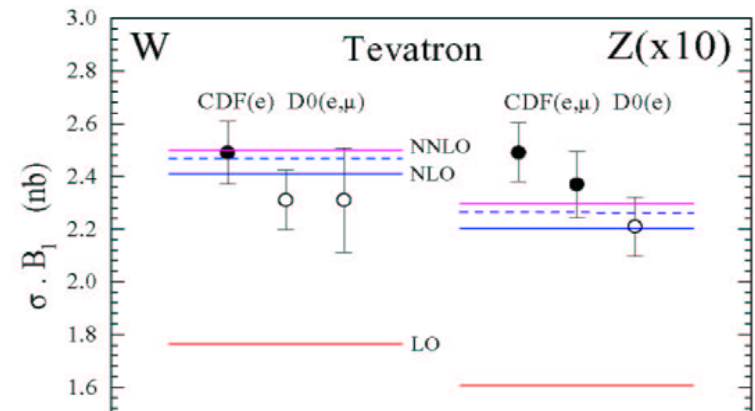


3 Skalen: m_Q , PTQ , Q^2
NLO PDF x NLO ME:
Gute Übereinstimmung

Tevatron Jets, W, Z



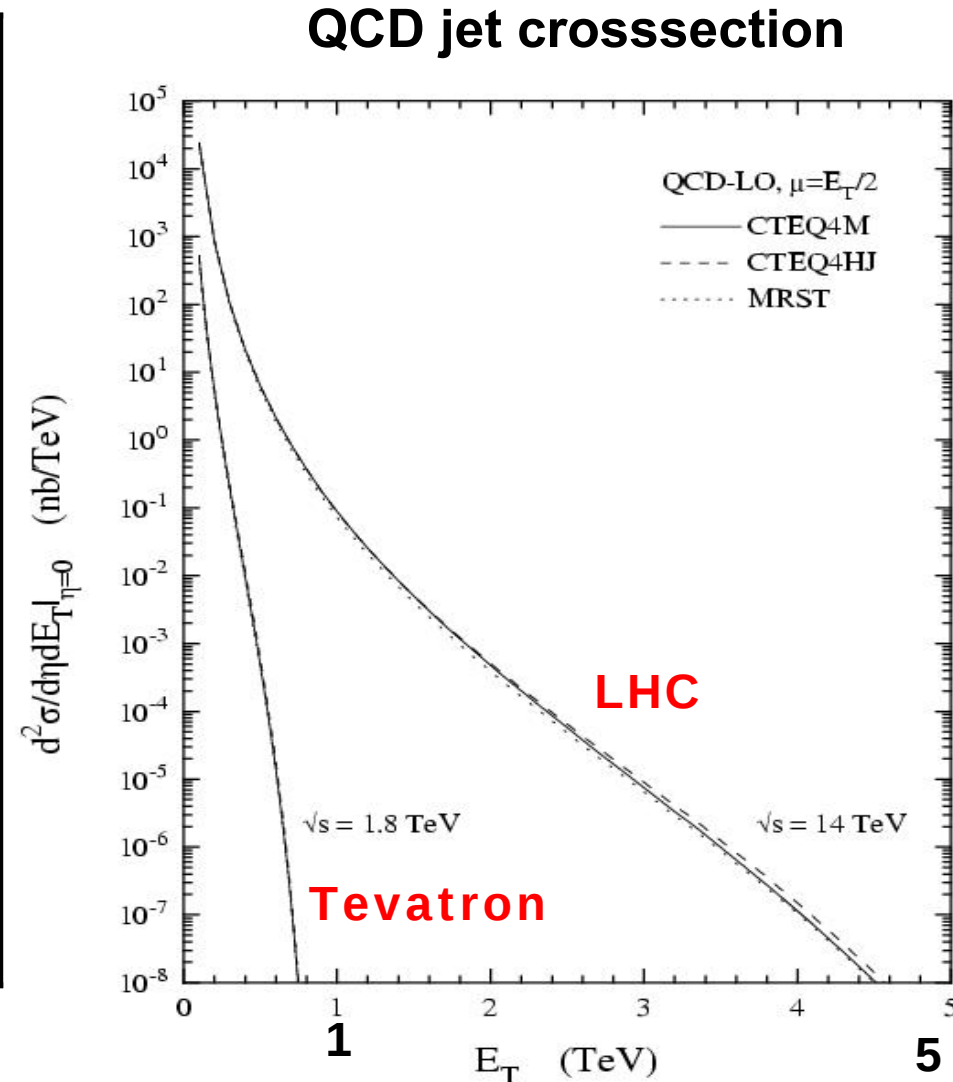
Jets: Große exp. und theoret. Unsicherheiten
W,Z: NLO – NNLO kleine Unterschiede



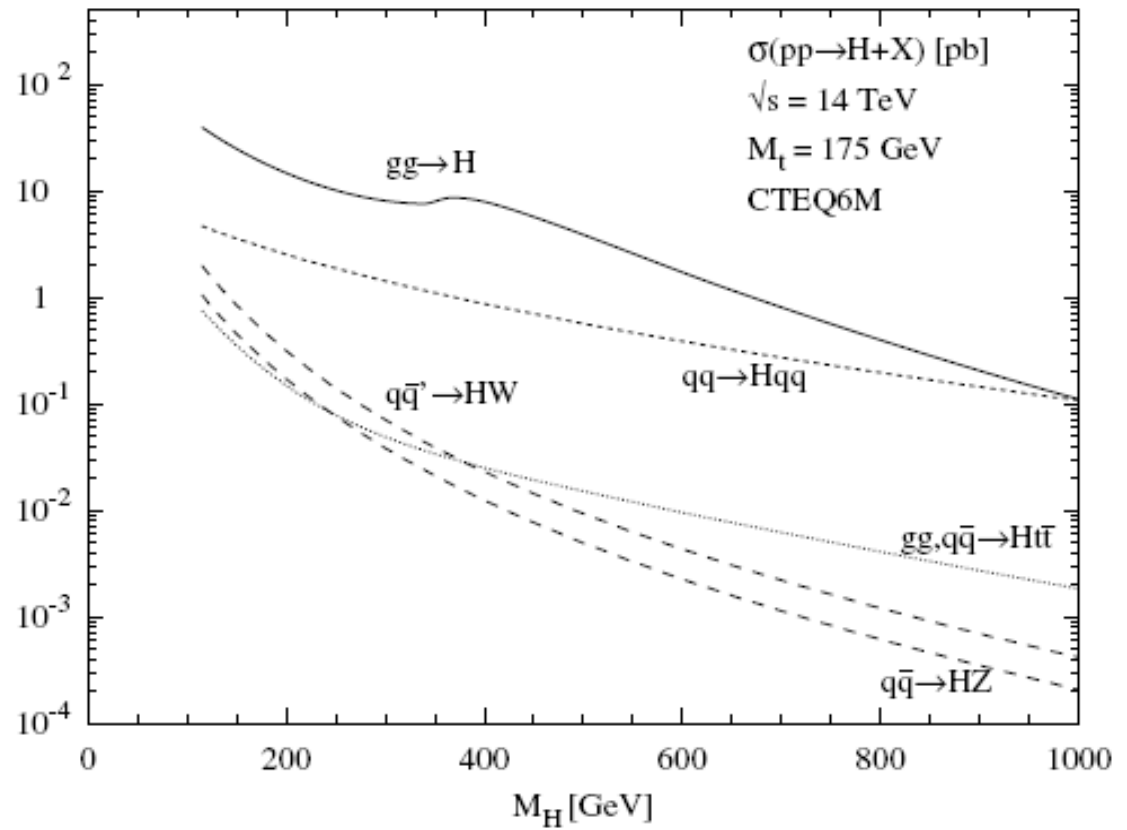
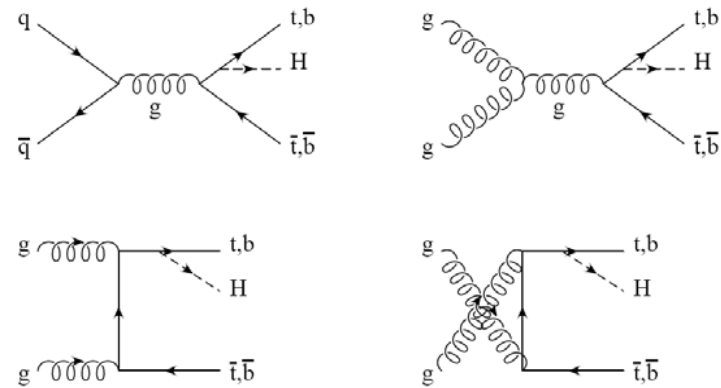
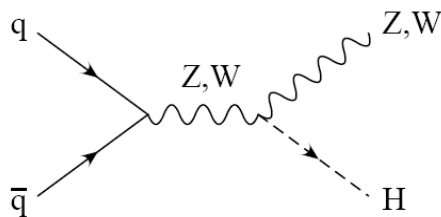
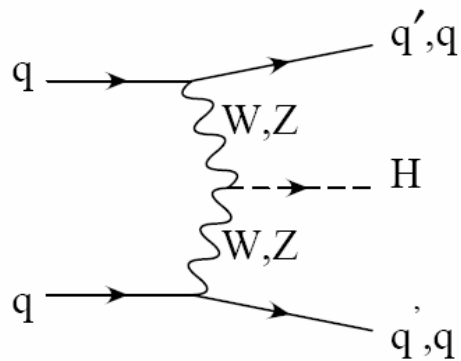
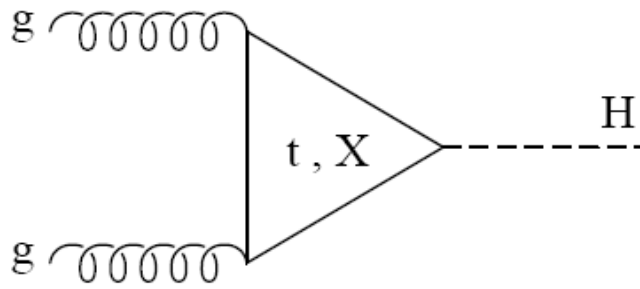
LHC Event rates

Expectations for 2008	Events $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Events per 1 fb^{-1}
QCD jets $E_T > 100 \text{ GeV}$	150 /sec	1.5×10^9
$W \rightarrow \mu \nu$	2 /sec	2×10^7
$Z \rightarrow \mu \mu$	0.2 /sec	2×10^6
$t \bar{t}$	0.1 /sec	10^6
Higgs $M_H = 125 \text{ GeV},$ 200 GeV	340 /day 115 /day	4×10^4 1.5×10^4
gluino-gluino $M_{\text{gluino}} = 1 \text{ TeV}$	0.8 – 8 /day	$10^2 \text{ to } 10^3$

$E_T = 40 \text{ GeV}$: jets / leptons = 10^5

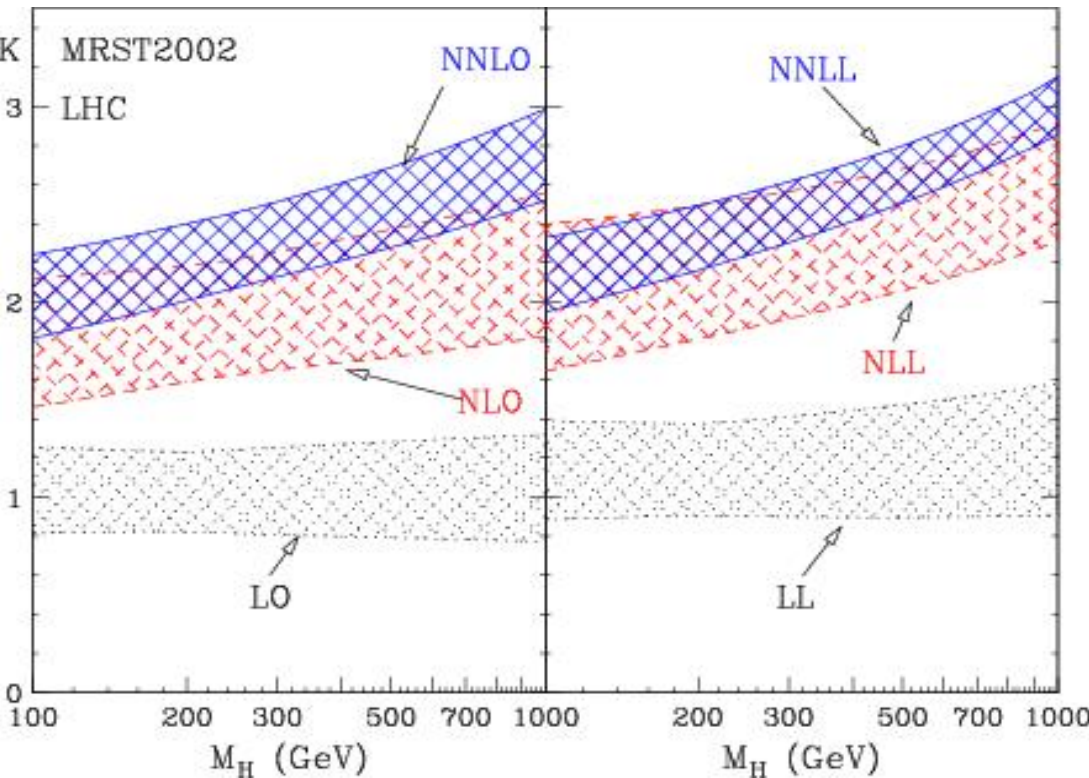


Higgs production at LHC



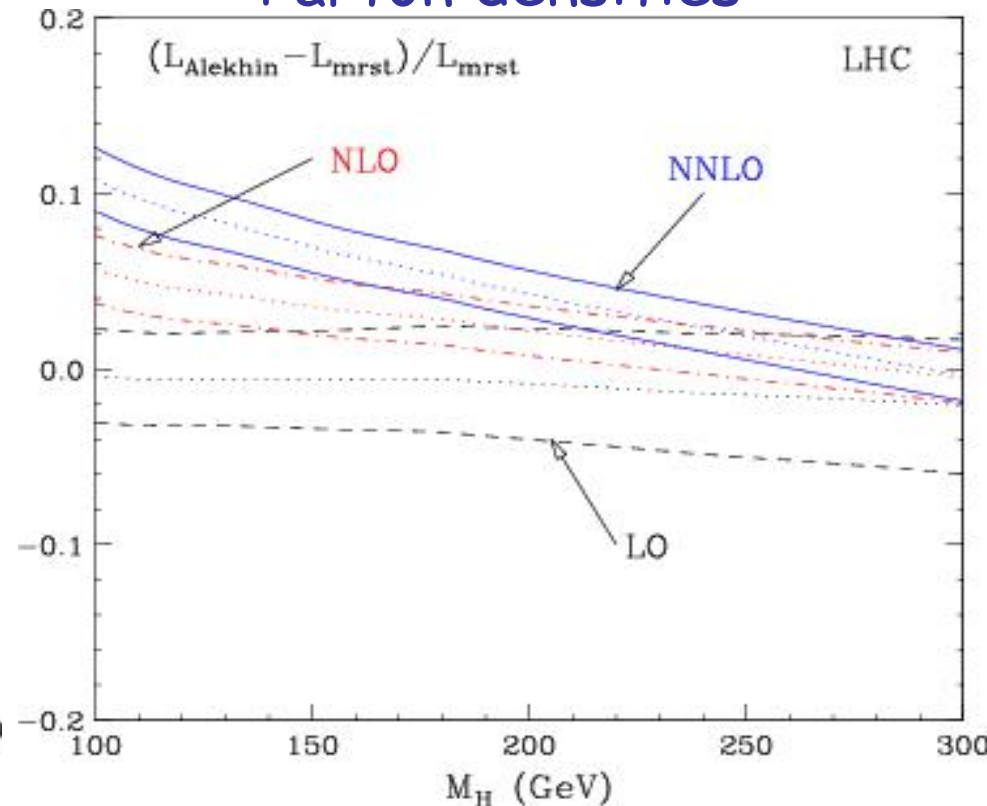
Benchmark test for status of QCD calculations

Higher orders



uncertainty $\sim 10\%$

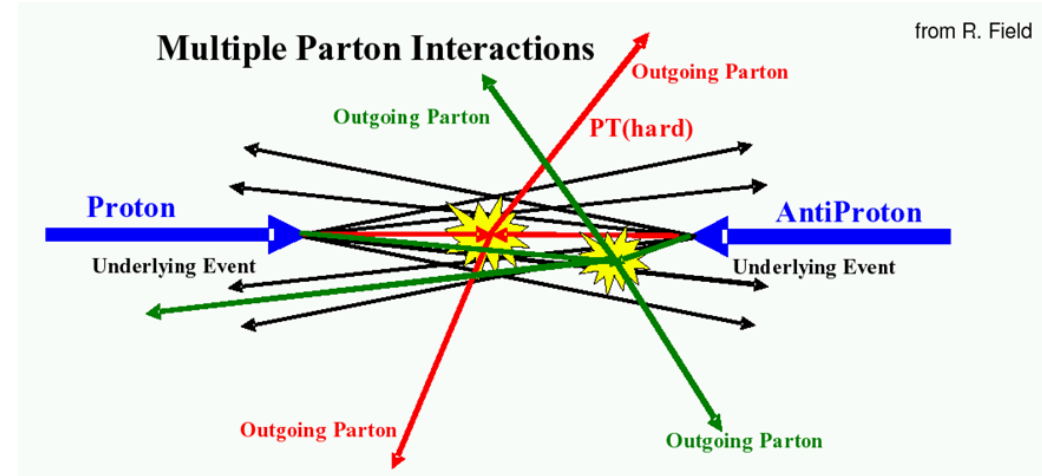
Parton densities



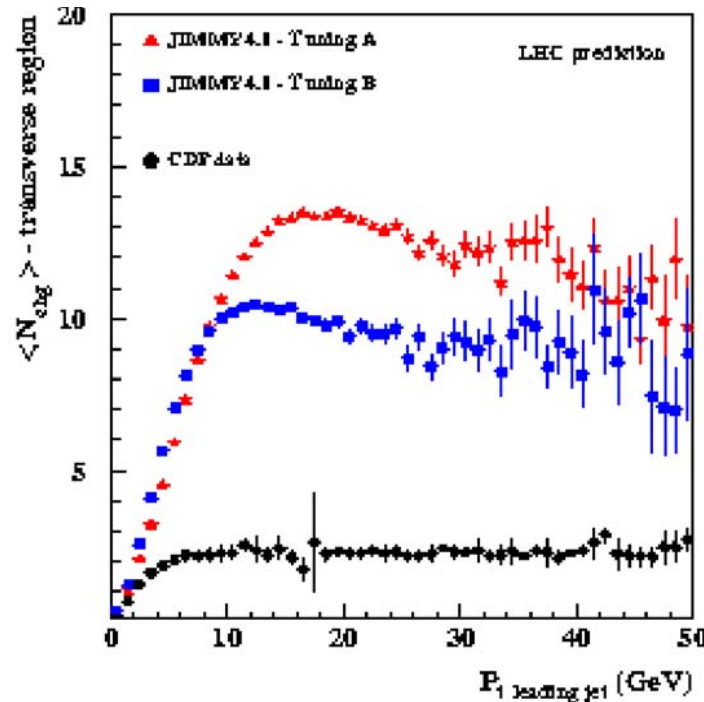
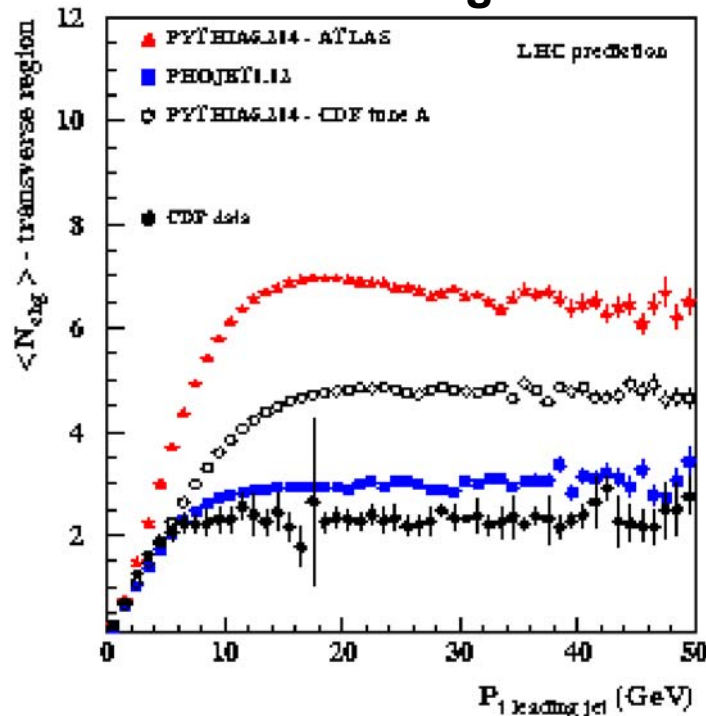
uncertainty $\sim 10\%$

Underlying event

- Models, no firm QCD predictions
- Large extrapol. uncertainties from Tevatron



Number of charged tracks outside region of hard jet(s)



per unit area in eta-phi:

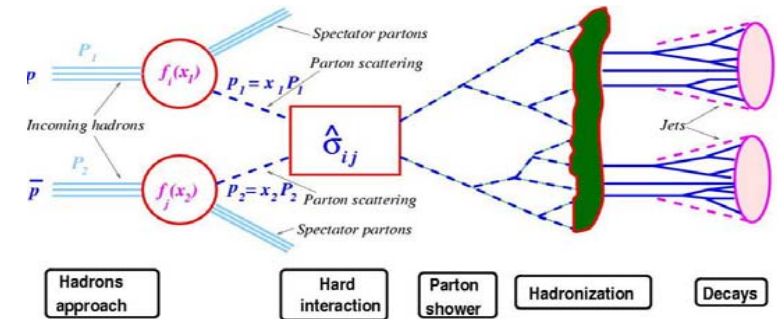
- $\langle N_{ch} \rangle \sim 1-2$
- $\langle PT_{ch} \rangle \sim 1-2 \text{ GeV}$
- Fluctuations ?

Needs to be measured in early data

Zusammenfassung

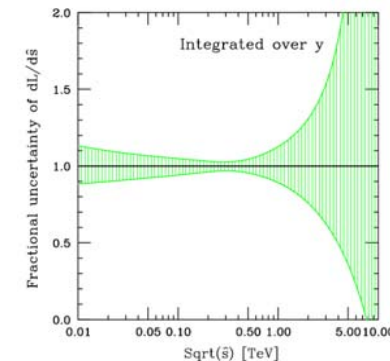
QCD Vorhersagen an Hadron- Kollidern:

- Faktorisierung von ME und PDF



- PDF von HERA, insbesondere Gluon-Dichte

- DIS inklusive $x < 0.1$
- Jets auch bei großen x
- Charm, Bottom kleine x
- F_L kleine x



5-10 % Fehler
außer bei großen x

→ Konsistente Beschreibung aller QCD Prozesse bei HERA bei großen Impulsüberträgen

→ Relevant für Tevatron, LHC

- QCD Rechnungen in NLO existieren, NNLO für manche Prozesse

- Probleme: Prozesse bei kleinen PT wie Multi-Parton WW

Prozesse mit hoher Jet-Multiplizität ?